



Grigorjan Gor, BSc

**Injektionstechnische Untersuchung zementbasierter  
Injektionsmischungen im Zuge des Projektes  
Semmering Basistunnel**

**Masterarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geotechnik und Wasserbau–Bauingenieurwissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Begutachter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Marte Roman

Betreuer: Oberrat Dipl.-Ing. Leibniz Otto

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik

Graz, September 2020

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

# Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, .....

.....  
(signature)

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ebenso bedanken ich mich bei den Laboranten des Institutes für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik für die exzellente Betreuung während der Entstehung dieser Arbeit.

Ein großer Dank gebührt meinem Betreuer dieser Arbeit Herrn Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz für die fachliche Diskussionen aber auch für die kompetente Unterstützung bei der Verfassung der hier vorliegenden Masterarbeit.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich während des gesamten Studiums und darüber hinaus unterstützt haben. Durch euren Rückhalt war es mir möglich diese Arbeit zu verfassen.

Graz, im September 2020

Grigorjan Gor

# Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit von Injektionsmitteln und dem Einfluss des W/Z Wertes auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert. Ziel des Forschungsvorhabens war es, die verschiedenen Bestimmungsmethoden zu evaluieren und miteinander zu vergleichen. Dafür wurden zunächst zementbasierte Injektionen, bestehend aus Zement und Bentonit, untersucht. Im nächsten Schritt wurden die Bestimmungsmethoden nach ÖNORM B 4422-1:1992 und nach DIN 18130-1:1998 erläutert und miteinander verglichen.

Neben dem Wasserzementwert und der Zementart, die entsprechend den Anforderungen der Suspensionsmittel definiert werden, ist das Injektionsmittel durch den rheologischen Parameter zu charakterisieren. Nur wenn die rheologischen Parameter auf die Anforderungen der Suspensionsmittel abgestimmt sind, können dessen erforderlichen Eigenschaften optimiert werden. Dabei sind fundierte Kenntnisse der rheologischen Eigenschaften für den speziellen Anwendungsbereich des Injektionsmittels notwendig.

Im nächsten Schritt wurde das rheologische Verhalten von zementbasierten Suspensionen im geotechnischen Labor des Instituts für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik der Technischen Universität Graz untersucht.

# Abstract

The water permeability of injection media as well as the influence of the W/C value on the water permeability coefficient is investigated in this thesis. Thereby, different determination methods are described and compared to each other.

Cement-based injections which are composed of cement and bentonite are investigated in a first step. The methods of determination according to ÖNORM B 4422-1:1992 and DIN 18130-1:1998 are described and compared.

In addition to the water-cement value and the type of cement, which are specified based on the suspension requirements, the injection grout is characterized by rheological parameters. The intended properties can only be optimized, if the rheological parameters are adjusted to the requirements of the suspension. Thereby, profound knowledge of the rheological properties for the special application areas of the injection grout is needed.

In the next step, the rheological behaviour of cement-based suspensions was examined in the geotechnical laboratory of the Institute of Soil Mechanics, Foundation Engineering and Numerical Geotechnics at the Graz University of Technology.

# Inhalt

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Begriffsbestimmungen und Definitionen .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Semmering Basistunnel.....</b>                    | <b>2</b>  |
| 2.1      | Deponie Longsgraben .....                            | 3         |
| 2.2      | Kontinuierliche Vortriebe in Richtung Gloggnitz..... | 4         |
| 2.3      | Zyklische Vortriebe.....                             | 5         |
| <b>3</b> | <b>Verwendete Materialien.....</b>                   | <b>6</b>  |
| 3.1      | Zement .....   | 6         |
| 3.2      | Bentonit.....  | 7         |
| <b>4</b> | <b>Rheologische Eigenschaften.....</b>               | <b>9</b>  |
| 4.1      | Allgemeines .....                                    | 9         |
| 4.2      | Dichte der Suspensionen.....                         | 10        |
| 4.2.1    | Beschreibung der Spülungswaage.....                  | 10        |
| 4.2.2    | Messzylinder .....                                   | 10        |
| 4.3      | Filterpresse .....                                   | 12        |
| 4.4      | Bestimmung des Absetzmaßes.....                      | 14        |
| 4.5      | Marsh-Trichter .....                                 | 15        |
| 4.6      | Beschreibung der Kugelharfe.....                     | 17        |
| <b>5</b> | <b>Viskosimetrie .....</b>                           | <b>19</b> |
| 5.1      | Einleitung.....                                      | 19        |
| 5.1.1    | Theoretische Grundlagen .....                        | 19        |
| 5.2      | Ursachen und Einflussfaktoren der Viskosität .....   | 21        |
| 5.3      | Thixotropes und rheopexes Verhalten.....             | 22        |
| 5.4      | Newtonsche und nicht-newtonsche Flüssigkeiten.....   | 22        |
| 5.5      | Methoden zur Viskositätsmessung.....                 | 24        |
| <b>6</b> | <b>Rotationsviskosimeter .....</b>                   | <b>25</b> |
| <b>7</b> | <b>Einaxiale Druckfestigkeit.....</b>                | <b>27</b> |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 7.1       | Allgemeines .....   | 27        |
| 7.2       | Durchführung und Auswertung der Versuche .....                            | 27        |
| 7.3       | Einflussfaktoren auf die Parameter .....                                  | 29        |
| 7.4       | Untersuchungen der Probengeometrie .....                                  | 30        |
| 7.5       | Empfehlungen zur Durchführung von einaxialen Druckversuchen .....         | 31        |
| <b>8</b>  | <b>Durchlässigkeit .....</b>  | <b>32</b> |
| 8.1       | Allgemeines .....   | 32        |
| 8.2       | Versuchsgrundlagen gemäß ÖNORM B 4422-1:1992 .....                        | 34        |
| 8.3       | Versuchseinrichtung.....  | 37        |
| 8.3.1     | Triaxialzelle & Triaxialgerät gemäß ÖNORM B 4422-1:1992 .....             | 37        |
| 8.3.2     | Kapillarmessung für $k < 10^{-10}$ .....                                  | 40        |
| <b>9</b>  | <b>Herstell- und Prüfverfahren von zementbasierten Suspensionen .....</b> | <b>41</b> |
| <b>10</b> | <b>Laboruntersuchungen.....</b>   | <b>45</b> |
| 10.1      | Dichte der Suspensionen .....   | 45        |
| 10.2      | Filterpresse .....  | 47        |
| 10.3      | Bestimmung des Absetzmaßes.....   | 48        |
| 10.4      | Beschreibung des Marsh-Trichters.....                                     | 49        |
| 10.5      | Beschreibung der Kugelharfe.....  | 50        |
| 10.6      | Bestimmung des pH-Wertes .....  | 52        |
| 10.7      | Rotationsviskosimeter .....   | 53        |
| <b>11</b> | <b>Durchlässigkeit .....</b>  | <b>57</b> |
| 11.1      | Triaxialzelle .....   | 57        |
| 11.2      | Triaxialgerät .....   | 60        |
| 11.3      | Kapillarmessung für $k < 10^{-10}$ .....                                  | 64        |
| <b>12</b> | <b>Schlussfolgerungen.....</b>  | <b>70</b> |
| <b>13</b> | <b>Literaturverzeichnis.....</b>  | <b>72</b> |
| <b>14</b> | <b>Anhang.....</b>  | <b>77</b> |

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Große Buchstaben

|            |                    |                                    |
|------------|--------------------|------------------------------------|
| $A$        | [m <sup>2</sup> ]  | Fläche                             |
| $A$        | [m <sup>2</sup> ]  | Querschnittsfläche der Probe       |
| $A$        | [%]                | Absetzmaß                          |
| $B_e$      | [g]                | Bentonit                           |
| $D$        | [s <sup>-1</sup> ] | Geschwindigkeitsgefälle            |
| $F$        | [N]                | Kraft                              |
| $M$        | [Nmm]              | Drehmoment                         |
| $V_0$      | [cm <sup>3</sup> ] | Ausgangsvolumen der Suspension     |
| $V_s$      | [cm <sup>3</sup> ] | Volumen der abgesetzten Suspension |
| $V_s$      | [cm <sup>3</sup> ] | Suspensionsvolumen                 |
| $V_{susp}$ | [cm <sup>3</sup> ] | Suspensionsvolumen                 |
| $W$        | [g]                | Wassers                            |
| $Z$        | [g]                | Zement                             |

## Kleine Buchstaben

|          |                     |  |
|----------|---------------------|--|
| $h_w$    | [m]                 | hydraulische Druckhöhe                                     |
| $h_s$    | [cm]                | Höhe der Schalkörper                                       |
| $h/d$    | [-]                 | Schlankheit der Probekörper                                |
| $i$      | [-]                 | hydraulisches Gefälle                                      |
| $k$      | [m/s]               | Durchlässigkeitsbeiwert                                    |
| $k_{10}$ | [m/s]               | Durchlässigkeitsbeiwert bei einer Normtemperatur von 10°C  |
| $k_g$    | [m/s]               | Durchlässigkeitsbeiwert bei tatsächlicher Wassertemperatur |
| $l$      | [m]                 | Länge des Probekörpers                                     |
| $l$      | [mm]                | Länge des Zylinders  |
| $m_s$    | [g]                 | Suspensionsgewicht   |
| $n$      | [s <sup>-1</sup> ]  | Drehzahl   |
| $q$      | [m <sup>3</sup> /s] | Durchflussvolumen je Zeiteinheit                           |



|               |       |                           |
|---------------|-------|---------------------------|
| $r_A$         | [mm]  | Radius des Außenzylinders |
| $r_I$         | [mm]  | Radius des Innenzylinders |
| $t_M$         | [s]   | Trichterauslaufzeit       |
| $v$           | [m/s] | Geschwindigkeit           |
| $v$           | [m/s] | Stauchungsgeschwindigkeit |
| $v$           | [m/s] | Filtergeschwindigkeit     |
| $\frac{w}{z}$ | [-]   | Wasserzementwert          |
| $y$           | [m]   | Abstand                   |

## Griechische Buchstaben

|             |                      |                               |
|-------------|----------------------|-------------------------------|
| $\alpha$    | [-]                  | Temperaturkorrekturbeiwert    |
| $\eta$      | [Ns/m <sup>2</sup> ] | dynamische Viskosität         |
| $\eta_a$    | [Ns/m <sup>2</sup> ] | scheinbare Viskosität         |
| $\eta_p$    | [Pa s]               | plastische Viskosität         |
| $\nu$       | [mm <sup>2</sup> /s] | kinematische Viskosität       |
| $\rho$      | [g/cm <sup>3</sup> ] | Dichte                        |
| $\rho_{Be}$ | [g/cm <sup>3</sup> ] | korndichte Bentonit           |
| $\rho_s$    | [g/cm <sup>3</sup> ] | Suspensionsdichte             |
| $\rho_w$    | [g/cm <sup>3</sup> ] | Dichte des Wassers            |
| $\rho_z$    | [g/cm <sup>3</sup> ] | korndichte des Zementes       |
| $\tau$      | [N/m <sup>2</sup> ]  | Schubspannung                 |
| $\tau$      | [N/m <sup>2</sup> ]  | Fließgrenze                   |
| $\tau_0$    | [N/m <sup>2</sup> ]  | Fließgrenze                   |
| $\vartheta$ | [°C]                 | tatsächliche Wassertemperatur |
| $\omega$    | [s <sup>-1</sup> ]   | Winkelgeschwindigkeit         |

# 1 Begriffsbestimmungen und Definitionen

**Bentonit:** Ton, der vorwiegend aus Mineralien der Montmorillonit-Gruppe besteht, dessen Hauptmerkmale eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit (mehr als 50 %) und eine sehr große Änderung des Volumens bei Sättigung oder Austrocknung sind. Der Mindestgehalt von quellfähigen Smektiten beträgt 70 % und es wird unterschieden zwischen natürlichen, kalzium- oder natriumhaltigen, modifizierten und aktivierten Bentoniten.

**Einaxiale Druckfestigkeit:** Auf die Flächeneinheit bezogene Last, bei der in einem einfachen Druckversuch eine seitlich nicht gestützte zylindrische oder prismatische Probe (Höhe =  $2 \times$  Breite) aus dem zu prüfenden Material versagt.

**Filterpresse:** Gerät zur Messung des Filterverlustes des Injektionsgutes.

**Filtrationswasser:** Flüssigkeitsmenge, die bei einem Filtrationsversuch während einer festgelegten Zeit durch einen Filter austritt.

**Hydratation:** Im Allgemeinen ein chemisch-physikalischer Vorgang, bei dem ein Stoff mit Wasser reagiert und Wasser an den betreffenden Stoff angelagert wird. Bei Zement führt die Reaktion zwischen den Hauptbestandteilen des Zements und dem Anmachwasser zu einer Bildung wasserhaltiger Verbindungen, die zum Erstarren und Erhärten führen.

**Marsh-Viskosität:** Die mit dem Marsh-Trichter ermittelte Auslaufzeit in Sekunden für ein bestimmtes Flüssigkeitsvolumen.

**Rheologische Eigenschaften:** Eigenschaften, die das Fließverhalten von Flüssigkeiten oder plastischen Feststoffen kennzeichnen.

**W/Z-Wert:** Der Wasserzementwert ist das Verhältnis zwischen der Masse des Wassers und der Masse des trockenen Zements im Injektionsgut.

**W/B-Wert:** Der Wasserbindemittelwert ist das Massenverhältnis des Wassers und des trockenen Bindemittels im Injektionsgut.

## 2 Semmering Basistunnel

Der Semmering Basistunnel ist für die Zukunft des Bahnverkehrs eine nachhaltige Investition. Als Teil der neuen Südstrecke stärkt er den baltisch - adriatischen Korridor in Europa und sorgt dafür, dass unsere Wirtschaft international wettbewerbsfähig bleibt. Ab 2026 verbindet der rund 27 km lange Bahntunnel, der zu den komplexesten Tunnelbauwerken in Europa zählt, das niederösterreichische Gloggnitz mit dem steirischen Mürzzuschlag und ermöglicht es, in weniger als zwei Stunden mit dem Zug von Wien nach Graz zu fahren. Die Errichtung erfolgt über zwei Portalbaustellen in Gloggnitz und Mürzzuschlag und drei Zwischenangriffen in der Göstritz, im Fröschnitzgraben und in Grautschenhof. (Daller et al. 2013)

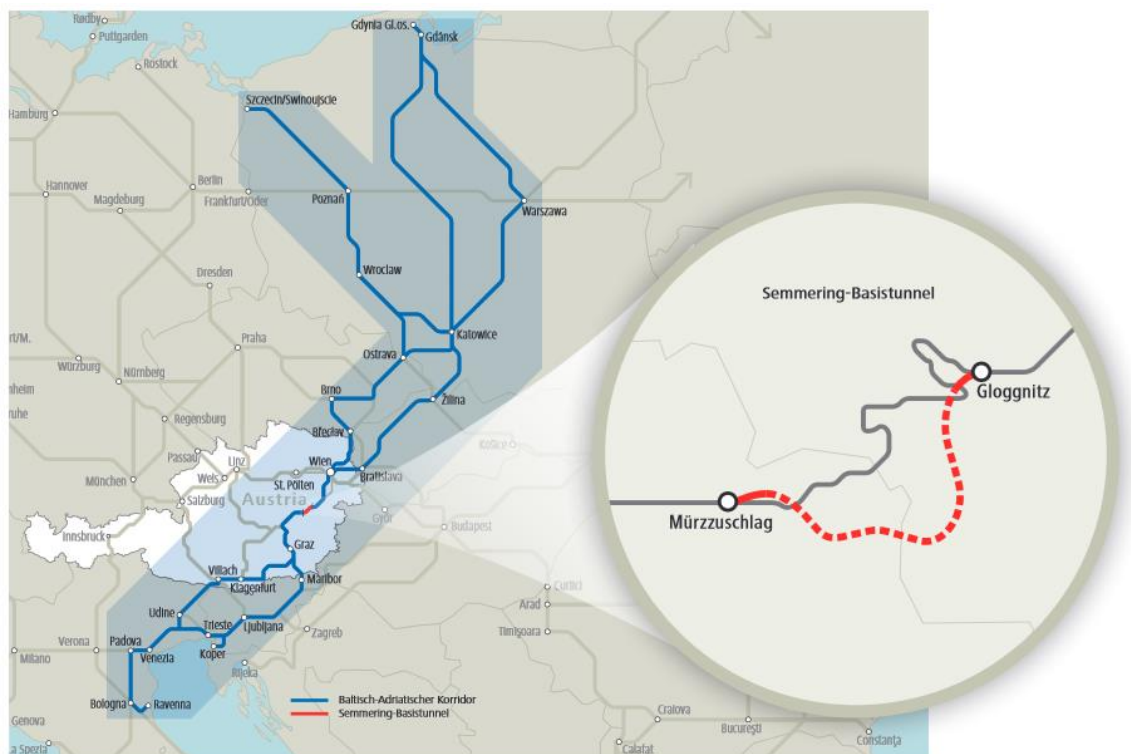


Abb. 1: Baltisch - Adriatischer Korridor ([www.infrastruktur.oebb.at](http://www.infrastruktur.oebb.at))

Die wesentlichen Elemente des Tunnelsystems sind die beiden eingleisigen Tunnelröhren, im Abstand von maximal 500 m zueinander angeordnete Querschläge, eine Nothaltestelle und zwei Lüftungsschächte. Der Tunnel ist in drei Baulose unterteilt, welche beginnend mit dem Tunnel Fröschnitzgraben (SBT2.1) ab 2014 im Jahresabstand begonnen werden. (Daller et al. 2013)

## 2.1 Deponie Longsgraben

Der anfallende Tunnelausbruch und sonstiges Aushubmaterial im Ausmaß von 6,2 Mio m<sup>3</sup> (fest) ist wiederzuverwenden, zu verwerten oder ordnungsgemäß zu entsorgen. Die im Longsgraben, einem unbewohnten Seitengraben des Frörschnitztals zu errichtende Deponie mit einem Fassungsvermögen von ca. 4,25 Mio m<sup>3</sup> (eingebaut) soll den Großteil der Aushubmassen aufnehmen und somit Transportbewegungen minimieren. Sie besitzt ein Bodenaushub- und ein Baurestmassenskompartiment. Die Anlieferung des Tunnelausbruchsmaterials erfolgt von benachbarten Baulosen mittels LKW oder innerhalb des Bauloses SBT2.1 über ein etwa 2,3 km langes Förderband von der Baustelleneinrichtungsfläche Frörschnitzgraben. Die Deponie Longsgraben dient zur Ablagerung des Tunnelausbruchs aus sämtlichen Zwischenangriffen sowie aus dem Portalbereich Mürzzuschlag. (Daller et al. 2013)



Abb. 2: Deponie Longsgraben

## 2.2 Kontinuierliche Vortriebe in Richtung Gloggnitz

Die Erfordernisse und das Vortriebssystem resultieren aus der geotechnischen Planung und ergeben die Notwendigkeit und die Eignung einer Tunnelbohrmaschine mit Einzelschild (TBM-S) oder einer Tunnelbohrmaschine mit Doppelschild (TBM-DS), mit der Möglichkeit zusätzliche und spezielle Maßnahmen im Bohrkopf- und Schildbereich planmäßig ausführen zu können. Die geotechnische Prognose zeigt ihre Häufigkeit und Zuordnung auf, wobei die spezifischen Anforderungen in den technischen Vertragsbestimmungen definiert sind. Das Erfordernis eines Tübbingrings in Kombination mit einer Ortbeton-Innenschale und dazwischen liegender druckentlastender Abdichtung wurde aus der Anforderungsprognose abgeleitet. Vorgesehen ist ein nicht gedichtetes Tübbingssystem. Im Sohlbereich besteht die planmäßige Ringspaltfüllung aus Mörtel und entlang des übrigen Umfangs ist Perlkies vorgesehen. Der Perlkies wird im Bereich des Querschlags mit Zement-Füller-Suspension verpresst. In gewissen Bereichen kann die Notwendigkeit der Nachverpressung von teilweise verkleustem Ringraum mit Mörtel oder der Bettungsverbesserung durch eine nachträglich injizierte Zement-Suspension bestehen. (Daller et al. 2013)

Als Tübbingssystem ist ein Parallelsystem für gerade Strecken kombiniert mit Korrekturringen für planmäßige Kurvenfahrten vorgesehen. Die Ausführung von Korrekturfahrten erfolgt über die Schiftung in den Ring. Vorgesehen sind folgende Tübbingtypen: Normal-Tübbing, Hochlast-Tübbing für Störungsbereiche und Querschlags-Tübbing im Bereich der Querschlagsöffnungen. (Daller et al. 2013)

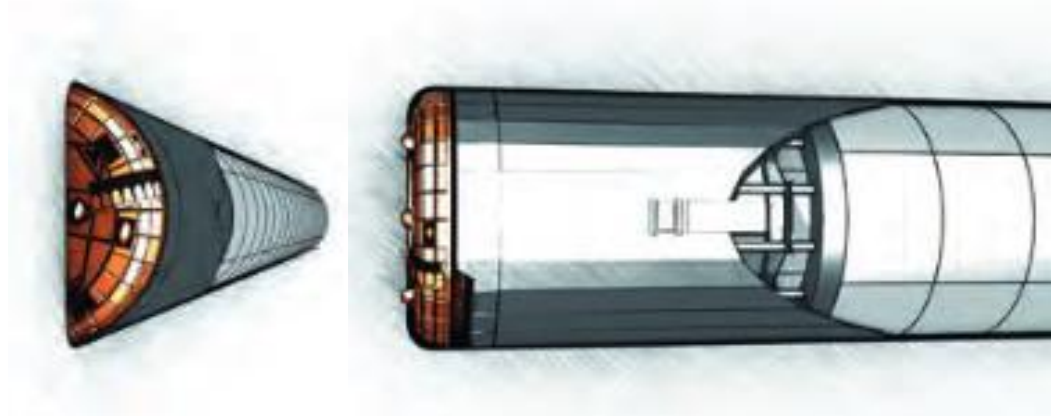


Abb. 3: Vortrieb mit Hilfe einer Tunnelvortriebsmaschine  
([www.infrastruktur.oebb.at](http://www.infrastruktur.oebb.at))



## 2.3 Zyklische Vortriebe

Abhängig von den geotechnischen Verhältnissen erfolgt der zyklische Vortrieb der Streckenröhren entweder als Vollquerschnitt (offene Sohle) oder in Teilquerschnitten Kalotte sowie Strosse inklusive Sohle. Eine weitere Unterteilung in Teilflächen ist je nach geotechnischem Erfordernis möglich. Ein „Stop-and-Go“-Betrieb ist als Auffahrkonzept vorgesehen. Anfallende Bergwässer werden über die gesamte Tunnellänge gefasst und über eine Förderleitung abgeleitet. In der Streckenröhre Richtung Mürzzuschlag muss die Innenschale teilweise gleichzeitig mit den Vortriebsarbeiten eingebaut werden. Dafür wurden in der Ausschreibung Querverbindungen (Logistikstollen) zwischen den beiden Streckenröhren in geotechnisch günstigen Abschnitten vorgesehen. (Daller et al. 2013)



Abb. 4: Neue Österreichische Tunnelbaumethode ([www.infrastruktur.oebb.at](http://www.infrastruktur.oebb.at))

## 3 Verwendete Materialien

### 3.1 Zement

Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Zement sind die natürlichen Rohstoffe Kalkstein und Ton. Sie werden in Brechern zerkleinert und in eine Rohmühle zu feinem Mehl vermahlen. Gleichzeitig werden sie mit dem heißen Abgas aus dem Brennprozess getrocknet. Dieses Rohmehl wird dann in einen Drehrohrofen geleitet und bei Temperaturen von etwa 1450 °C runden Partikeln, dem sogenannten Zementklinker, gebrannt. Diesen Prozess nennt man Sintern, bei dem sehr viel Energie benötigt wird. Nach dem Brennen fällt der Zementklinker aus dem Drehrohrofen und wird in einer Kühltrommel auf etwa 200 °C heruntergekühlt. Unter Zusatz von Gips oder Anhydrit und zum Teil weiteren Zuschlagstoffen wie Hüttensand, Flugasche und Kalkstein wird der Klinker in Mühlen zu feinem Zement vermahlen. Menge und Art der Zusätze beeinflussen die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Zements. Der Zement wird in Silos aufbewahrt und überwiegend als lose Ware zur Weiterverarbeitung geliefert. (Neroth & Vollschaar 2011)

Die EN 197-1:2011 klassifiziert die Zemente, in Abhängigkeit der Hauptbestandteile, in fünf Arten:

- CEM I - Portlandzement
- CEM II - Portlandkompositzemente
- CEM III - Hochofenzemente
- CEM IV - Puzzolanzemente
- CEM V – Kompositzemente

Als Hauptbestandteile kommen dabei folgende Komponenten zur Anwendung: Portlandzementklinker, Hüttensand, Puzzolane, Flugaschen, gebrannter Schiefer, Kalkstein und Silikastaub.

Zusätzlich zur Zementart trifft die EN 197-1 noch eine Klassifizierung nach der Festigkeitsklasse des Zementes. Entsprechend der nach 28 Tagen Erhärtung erreichten Mindestdruckfestigkeit (= Normfestigkeit) wird Normalzement grundsätzlich in die drei Festigkeitsklassen 32,5 / 42,5 / 52,5 eingeteilt. Die Zusätze „L“ (langsam), „N“ (normal) und „R“ (rapid) beschreiben des Weiteren die Anfangsfestigkeit, d.h. wie schnell der Zement aushärtet.

## 3.2 Bentonit

Die Definition von Bentonit erfolgt auf der unter „[www.bentonit.de](http://www.bentonit.de)“ angeführten Möglichkeiten. Diese werden folgend kurz zusammengefasst:

Unter dem Begriff Bentonit versteht man tonhaltiges Gestein, das durch einen Verwitterungsprozess aus vulkanischer Asche entstanden ist. Das Gestein ist ca. 12 bis 14 Millionen Jahre alt und der erste Fundort war Fort Benton (USA), woher es auch seinen Namen bekam. Seine speziellen Eigenschaften erhält das Tonmineral Montmorillonit. Diese Smektitgruppe kommt in der südfranzösischen Stadt Montmorillon vor.

Ein Bentonit muss nach allgemeiner Definition mindestens 50 % der Smektitgruppe Montmorillonit beinhalten, weshalb auch manchmal die Bezeichnung „Montmorillonit-Bentonit“ vorkommt. Andere Minerale, die im Bentonit enthalten sind, sind Quarz, Glimmer, Feldspat oder Kalk in diversen Anteilen. Wenn der Montmorillonit-Anteil unter 50 % liegt wird er als „smektit- bzw. Montmorillonithaltiger “Ton” bezeichnet.

Montmorillonit ist ein Aluminiumhydrosilikat, das zu den Phyllosilikaten zählt. Weiters zählt das Mineral zu den Dreischichtsilikaten, die als Smektite bezeichnet werden. Oft werden Bentonit, Smektit und Montmorillonit synonym für quellfähige Mehrschichtsilikate gebraucht.

Bentonitlagerstätten finden sich weltweit, wobei man zwischen primären und sekundären Lagerstätten unterscheidet. Erstere entstanden durch örtliche Verwitterung vulkanischer Gesteine, bei den sekundären Lagerstätten erfolgt vor der Verwitterung ein Transport der vulkanischen Asche beispielsweise durch Wind.

Die kleinsten Bausteine von Tonen sind Siliziumdioxid-Tetraeder, bei denen vier Sauerstoffatome ein Siliziumatom umgeben und Aluminium-Oktaeder mit einem zentralen Aluminiumatom und sechs Sauerstoffatomen angeordnet sind. Wenn sich diese Bausteine verknüpfen, bilden sich sogenannte Lamellen. Je nach Anzahl der Schichten unterscheidet man zwischen Zwei-, Drei- und Vier-Schicht Mineralen. Das bedeutendste Zweischichtmineral ist Kaolinit.

Wenn Wasser zwischen den Elementarschichten eindringt und den Abstand verändert, entsteht Quellung. Bei diesem Quellvorgang unterscheidet man die „innerkristalline Quellung“, d.h. der Abstand wird erweitert und „osmotische Quellung“, welche auf Konzentrationsunterschiede zwischen Innen- und Außenlösung beruht.



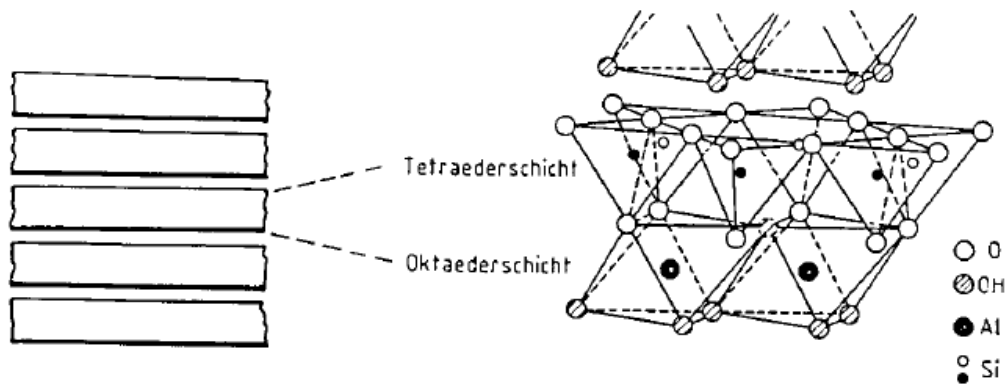


Abb. 5: Räumliche Darstellung der Schichtstruktur der Zweischichtminerale nach Kulicke (1986)

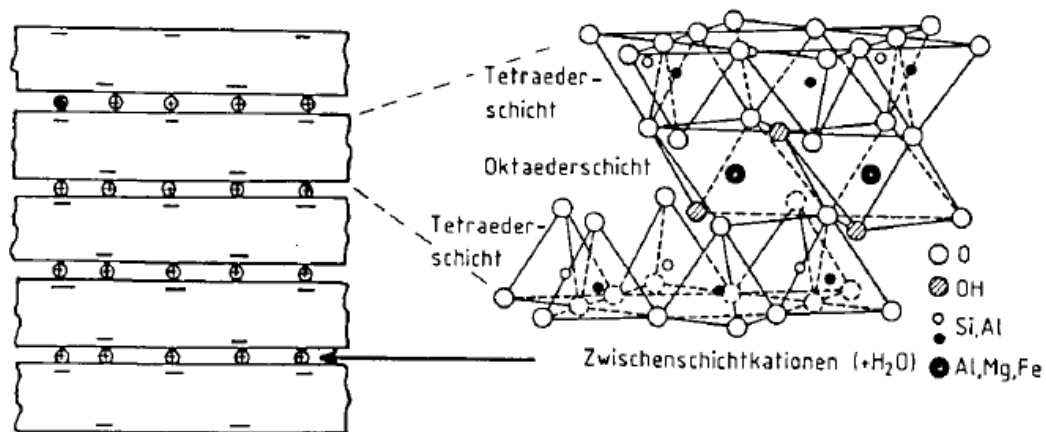


Abb. 6: Räumliche Darstellung der Schichtstruktur der Dreischichtminerale nach Kulicke (1986)

Eine wertgebende Eigenschaft des Bentonits ist sein Smektit-Gehalt. Hier existiert jedoch keine Mindestgehaltsangabe, sondern je nach Einsatzbereich verschiedene Definitionen. Beispielsweise formuliert die European Bentonite Association (EUBA) keinen bestimmten Mindestgehalt, trotzdem gibt sie vor, dass ein Bentonit überwiegend (mehr als 50 %) aus Smektitmineralien bestehen muss.

## 4 Rheologische Eigenschaften

### 4.1 Allgemeines

Zur Optimierung der physikalischen Eigenschaften von zementbasierten Suspensionen entsprechend den projektspezifischen Erfordernissen steht eine große Anzahl von Zusatzstoffen und -mitteln zur Auswahl. Die Eigenschaften der Suspensionen sowohl im flüssigen als auch im erhärteten Zustand werden durch viele, teilweise nur schwer kontrollierbare Einflussfaktoren, wie z.B. Mahlfineinheit, Zusatzstoffe, Dispergierungsgrad und Temperatur bestimmt, insbesondere bei hohen W/Z-Werten, die in der Injektionstechnik üblich sind. (Kainrath 2017)

Aus diesem Grund ist eine Eignungsprüfung für das auf den zu injizierenden Untergrund auszuwählende optimale Injektionsgut zwingend erforderlich. Die rheologischen Eigenschaften des Injektionsgutes spielen dabei neben den allgemeinen Eigenschaften wie Dichte und Festigkeit eine wesentliche Rolle. Aufgrund dieser Eigenschaften kann das Fließverhalten des Injektionsgutes im Untergrund grundlegend beschrieben werden. (Kainrath 2017)

Aufgrund der Vielfalt der verfügbaren Zusatzstoffe und -mittel ist die den Projekterfordernissen entsprechende Auswahl und Optimierung der am besten geeignetsten Suspension keineswegs eine Routineaufgabe, sondern ein iterativer Anpassungsprozess. (Kainrath 2017)

Deshalb können auch keine allgemein gültigen Empfehlungen für Mischungen abgegeben werden, da die Eigenschaften einer Mischung von sehr vielen Faktoren, wie Wasserchemismus, Zement und Zusatzstoffen, bestimmt werden. (Kainrath 2017)

Die grundlegende Problematik bei der Prüfung von Injektionsgut liegt darin, dass die meisten gängigen Verfahren aus den Bereichen der Geotechnik und des Betonbaus übernommen wurden und oft nicht die tatsächlichen physikalischen Eigenschaften des Injektionsgutes erfassen. Die in der ÖNORM EN 12715:2001 vorgeschlagenen Prüfmethode entsprechen häufig nicht mehr den Anforderungen heutiger Projekte an Prüfung und Qualitätssicherung. Speziell bei rheologischen Prüfungen sowie der Prüfung der Festigkeitsentwicklung von Zementsuspensionen fehlen praxistaugliche und genaue Prüfverfahren. (Kainrath 2017)

## 4.2 Dichte der Suspensionen

### 4.2.1 Beschreibung der Spülungswaage

Zur Eruierung der Dichte von Suspensionen wird Spülungswaage herangezogen. Die Spülungswaage besteht aus einem an einem Waagebalken befestigten Probenbecher. Diese Probenbecher wird mit der Suspension gefüllt. Mit einem Ausgleichsgewicht, das auf dem Waagebalken mit graduierter Skala verschoben wird, bringt man die Waage in Gleichgewicht. Zusätzlich gewährleistet eine am Waagebalken befindliche Libelle die genaue Balance der Spülungswaage. Die Dichte wird auf dem Waagebalken an der Position abgelesen, an der sich das Ausgleichsgewicht befindet. (ÖNORM EN ISO 10414-1:2009)

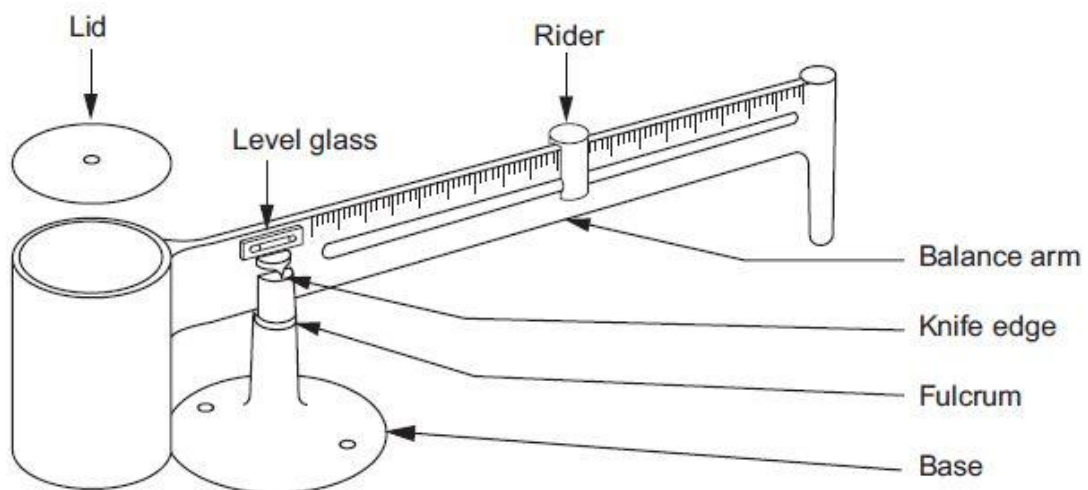


Abb. 7: Spülungswaage entsprechend ÖNORM EN ISO 10414-1:2009  
([www.tran.su](http://www.tran.su))

### 4.2.2 Messzylinder

Um die Suspensionsdichte zu bestimmen, bedient man sich eines  $1000 \text{ cm}^3$  Messzylinders (gradiert und eichfähig), einer Laborwaage und einer Einwegspritze, um überschüssige Suspensionen zu entfernen.  $1000 \text{ cm}^3$  Suspension wird in den Messzylinder überführt. Mit der Einwegspritze wird überschüssige Suspension oder Schaum entfernt. Danach erfolgt das Wiegen des Zylinders. Der

Quotient von Suspensionsgewicht  $m_s$  und Suspensionsvolumen  $V_s$  ergibt schließlich die Suspensionsdichte  $\rho_s$  in. (Prüfvorschriften des Sachgebietes Spezialtiefbau/Umwelttechnik: Prüfvorschrift T-805)

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (1)$$

|          |                      |                    |
|----------|----------------------|--------------------|
| $\rho_s$ | [g/cm <sup>3</sup> ] | Suspensionsdichte  |
| $m_s$    | [g]                  | Suspensionsgewicht |
| $V_s$    | [cm <sup>3</sup> ]   | Suspensionsvolumen |

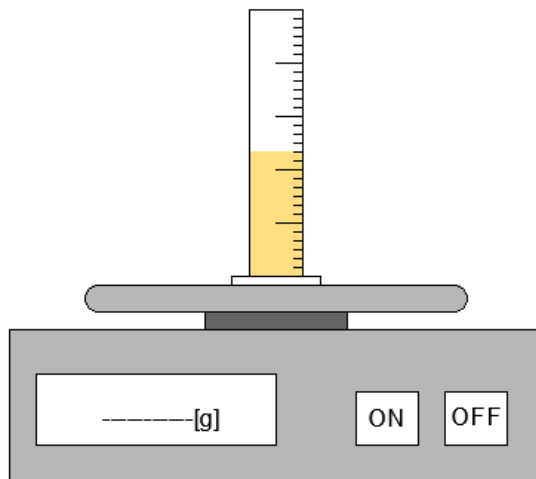


Abb. 8: Waage mit Messzylinder

### 4.3 Filterpresse

#### Beschreibung des Gerätes

Ein Zylinder mit einem Innendurchmesser von 76,2 mm und einer Mindesthöhe von 63,5 mm dient zur Aufnahme der Tonsuspension. Ein mit einem Dichtungsring versehener Deckel schließt den Zylinder fest und wird mittels einer an einem äußeren Rahmen angebrachten Schraube gegen den Zylinder gedrückt. Das Druckgas wird über eine Öffnung im Deckel eingeleitet. Ein von einem Blatt Drahtsieb gestütztes Filterpapier DIN 53135-2b schließt den Boden ab. Unterhalb davon liegen eine Fußplatte mit Ablassrohr und die zum wirksamen Abschluss erforderlichen Dichtungen. Als freie Filterfläche sollen exakt 45,1 cm<sup>2</sup> zur Verfügung stehen. Der Filtrationsdruck soll  $7 \pm 0,35$  bar (Druckluft, Stickstoff oder Kohlendioxid) betragen. Der Druck in der Filterpresse muss regelbar sein. Zur Volummessung des Filtratwassers muss ein Messzylinder mit einer Mindestteilung von 0,5 cm<sup>3</sup> verwendet werden. (DIN 4127:2014)

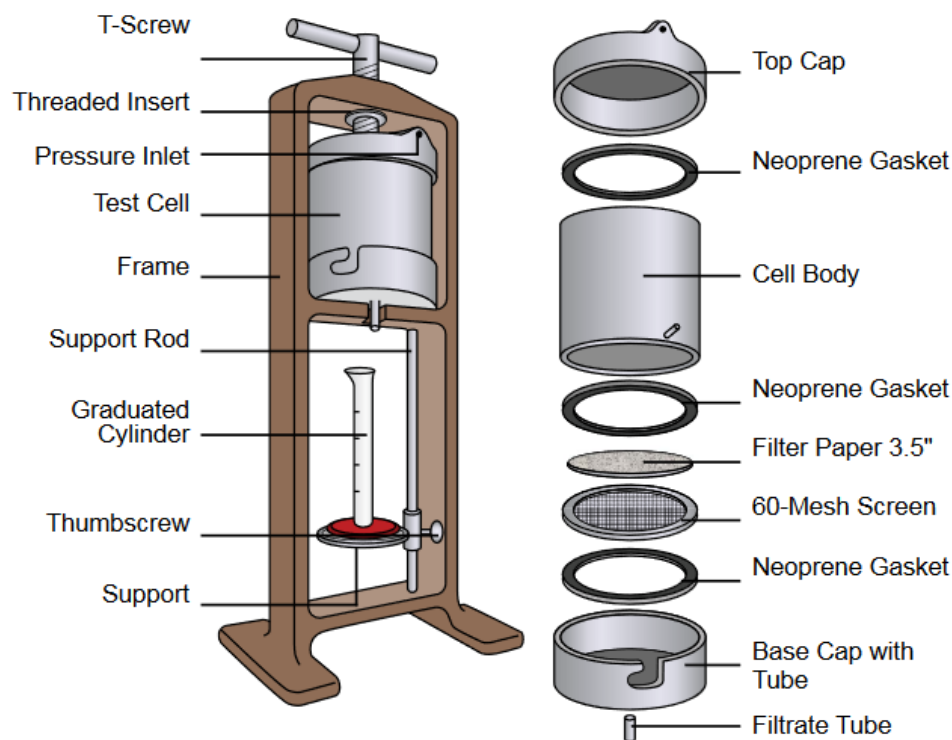


Abb. 9: Filterpresse nach DIN 4127:2014 ([www.ofite.com](http://www.ofite.com))

**Durchführung**

Die zu prüfende Flüssigkeit wird bis ca. 10 mm unterhalb des oberen Zylinderandes gefüllt. Bei einer Temperatur von  $20 \pm 2$  °C ist anschließend der Filtrationsdruck von  $7 \pm 0,35$  bar mittels Druckregler so einzustellen, dass er innerhalb von maximal 30 s erreicht wird. Die zu messende Filtratwasserabgabe ist definiert als das Volumen des Filtratwassers in  $\text{cm}^3$  nach einer Filtrationszeit von 7,5 min ab dem Einsetzen des Druckes. Standardabweichung unter Vergleichsbedingungen  $2,0 \text{ cm}^3$ . (DIN 4127:2014)

## 4.4 Bestimmung des Absetzmaßes

Das Wasserabsetzmaß als Kennwert für die Sedimentationsstabilität wird meist nach ÖNORM EN 12715:2001 ermittelt. Die Suspension wird dabei bei einer Temperatur von 20 °C in einen 1000 ml Messzylinder mit einem Durchmesser von 60 mm eingebracht und nach 2 Stunden erfolgt die Messung der Höhe des freien Wassers bezogen auf die Gesamthöhe des Zylinders. Suspensionen werden als stabil betrachtet, wenn das Wasserabsetzmaß nach 2 Stunden unterhalb von 5 % liegt.

$$A = \frac{V_0 - V_s}{V_s} \times 100 \quad (2)$$

|                |                    |                                    |
|----------------|--------------------|------------------------------------|
| A              | [%]                | Absetzmaß                          |
| V <sub>0</sub> | [cm <sup>3</sup> ] | Ausgangsvolumen der Suspension     |
| V <sub>s</sub> | [cm <sup>3</sup> ] | Volumen der abgesetzten Suspension |

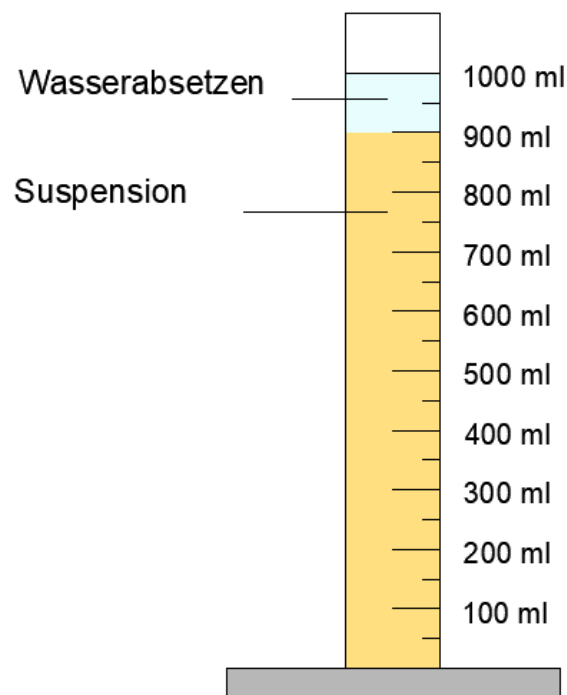


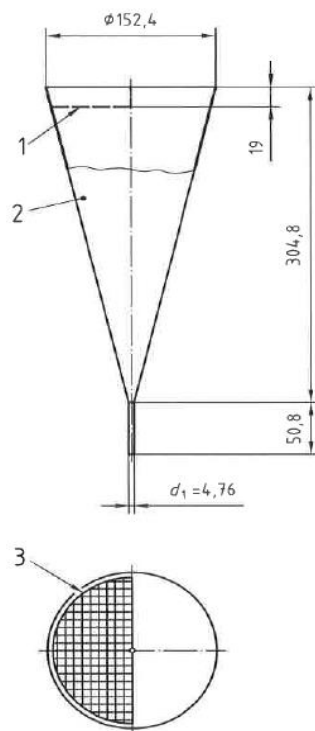
Abb. 10: Messzylinder

## 4.5 Marsh-Trichter

Als Standardversuch zur Ermittlung von Viskositätswerten gilt in der Injektionstechnik der Marshtrichter. Basierend auf dem Auslaufversuch von Marsh wird die Auslaufzeit eines bestimmten Suspensionsvolumens aus einem Trichter gemessen, welche als Marshzeit  $t_M$  bezeichnet wird und in der Praxis als gängiger Richtwert zur Beurteilung der rheologischen Eigenschaften von Suspensionen herangezogen wird. (Kainrath 2017)

Dabei ist zu beachten, dass international eine Vielzahl unterschiedlicher Trichter in Verwendung ist, was Vergleiche erschwert. In Europa kommt der Trichter nach DIN 4127:2014 mit einem Trichtereinhalt von  $1500 \text{ cm}^3$  und einer Auslaufdüse mit einem Durchmesser von  $4,76 \text{ mm}$  zur Anwendung. Das Gerät ist in Abb. 11 dargestellt. (Kainrath 2017)

Der Marshtrichterversuch dient zur Ermittlung von Viskositätsrichtwerten, welche nur durch einen Kennwert und der ist die Auslaufzeit dargestellt werden. Die Aussagekraft dieses Kennwertes bezüglich des rheologischen Verhaltens von Suspension ist jedoch als problematisch zu betrachten, da eine Vielzahl von Faktoren das rheologische Verhalten beeinflusst, insbesondere bei der Anwendung von Zusatzmitteln zur Beeinflussung der rheologischen Eigenschaften.



1. Sieb
2. Marsh – Trichter ( $1500 \text{ cm}^3$ )
3. Sieb, Maschenweite  $1,6 \text{ mm}$
4. Messbecher

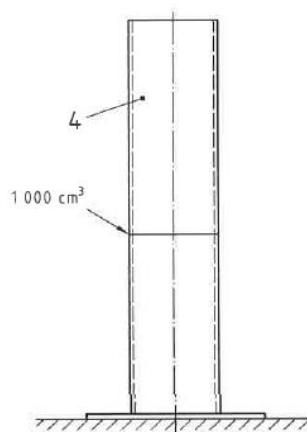


Abb. 11: Marsh – Trichter nach DIN 4127:2014



Die Marshzeit stellt vielmehr eine Mischung aus Dichte, Fließgrenze, Viskosität und Seitenreibung am Trichter dar. (Kainrath 2017)

Einerseits wird bei hohen Fließgrenzen das Ausfließen aus dem Trichter behindert, andererseits gibt es bei sehr niedrigen Viskositäten keinen linearen Zusammenhang mehr zwischen Marshzeit und Viskosität. (Kainrath 2017)

Trotz dieser Problematik und der eingeschränkten Aussagekraft ist aus baupraktischer Sicht die Anwendung des Marshtrichters als simples und robustes Werkzeug zur Qualitätskontrolle auf der Baustelle durchaus berechtigt. Allerdings darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Aussagekraft beschränkt ist bei:

- hohen Fließgrenzen
- geringer Viskosität
- Verwendung von Zusatzmitteln. (Kainrath 2017)

## 4.6 Beschreibung der Kugelharfe

Die Messung der Fließgrenze erfolgt durch gleichzeitiges Eintauchen verschieden großer Glas- und Stahlkugeln in die stützende Flüssigkeit. Jeder einzelnen Kugel ist eine entsprechende kritische Fließgrenze zugeordnet, bei welcher sie bei gegebener Dichte der stützenden Flüssigkeit in Schwebelage bleibt. Ist die zugeordnete kritische Fließgrenze der Kugel höher als die Fließgrenze der stützenden Flüssigkeit, dann taucht die Kugel unter. Kugeln, deren zugeordnete kritische Fließgrenze geringer ist als die Fließgrenze der stützenden Flüssigkeit, schwimmen auf der Oberfläche der stützenden Flüssigkeit. Die Kugeln sind der Reihe nach entsprechend der zunehmenden jeweiligen kritischen Fließgrenze laufend nummeriert. Somit liegt die Fließgrenze der stützenden Flüssigkeit zwischen der noch schwimmenden Kugel mit der höchsten Nummer und der eingetauchten Kugel mit der nächsten Nummer. Abb. 13 zeigt die kritischen Fließgrenzen aller Kugeln für die Dichten  $\rho_s$  zwischen 1,03 und 1,17 g/cm<sup>3</sup>. (DIN 4127:2014)

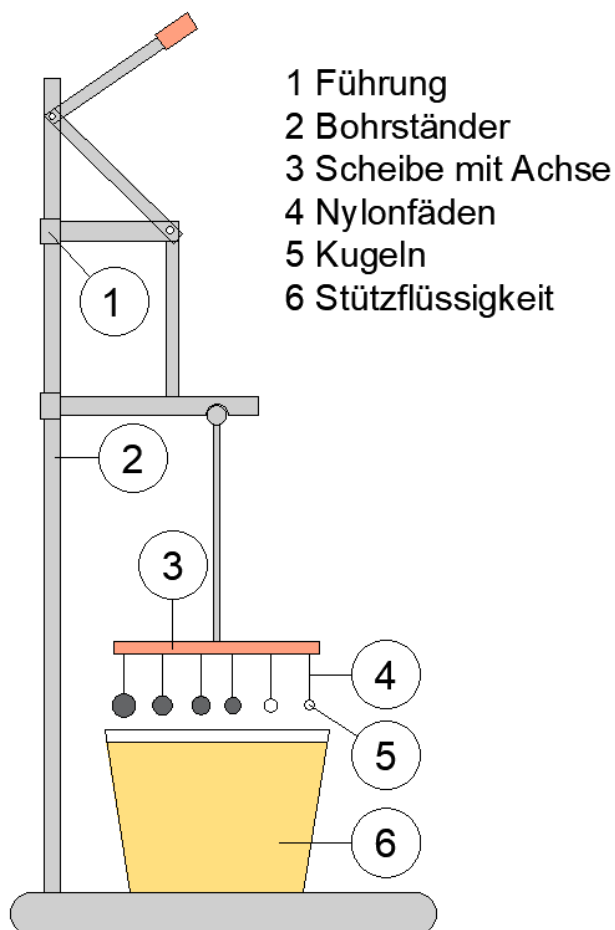


Abb. 12: Kugelharfe

| Kugel |               |                   | Fließgrenze in N/m <sup>2</sup><br>für $\rho_F$ in g/cm <sup>3</sup> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|---------------|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nr    | Werkstoff     | Durchmesser<br>mm | Gewicht<br>g   | 1,02  | 1,03  | 1,04  | 1,05  | 1,06  | 1,07  | 1,08  | 1,09  | 1,10  | 1,11  | 1,12  | 1,13  | 1,14  | 1,15  | 1,16  | 1,17  |
| 1     | Glas          | 2,9               | 0,033  | 6,90  | 6,86  | 6,82  | 6,78  | 6,74  | 6,70  | 6,66  | 6,62  | 6,58  | 6,54  | 6,50  | 6,44  | 6,38  | 6,32  | 6,26  | 6,20  |
|       | Zwischenwerte |                   |  | 8,45  | 8,40  | 8,35  | 8,30  | 8,25  | 8,20  | 8,15  | 8,10  | 8,05  | 8,00  | 7,95  | 7,88  | 7,81  | 7,74  | 7,67  | 7,60  |
| 2     | Glas          | 4,2               | 0,105  | 10,00 | 9,94  | 9,88  | 9,82  | 9,76  | 9,70  | 9,64  | 9,58  | 9,52  | 9,46  | 9,40  | 9,32  | 9,24  | 9,16  | 9,08  | 9,00  |
|       | Zwischenwerte |                   |  | 11,90 | 11,83 | 11,76 | 11,69 | 11,62 | 11,55 | 11,47 | 11,39 | 11,31 | 11,23 | 11,15 | 11,07 | 10,99 | 10,91 | 10,83 | 10,75 |
| 3     | Glas          | 5,8               | 0,260  | 13,80 | 13,72 | 13,64 | 13,56 | 13,48 | 13,40 | 13,30 | 13,20 | 13,10 | 13,00 | 12,90 | 12,82 | 12,74 | 12,66 | 12,58 | 12,50 |
|       | Zwischenwerte |                   |  | 15,95 | 15,85 | 15,75 | 15,65 | 15,55 | 15,45 | 15,34 | 15,23 | 15,12 | 15,01 | 14,90 | 14,81 | 14,72 | 14,63 | 14,54 | 14,45 |
| 4     | Glas          | 7,6               | 0,600  | 18,10 | 17,98 | 17,86 | 17,74 | 17,62 | 17,50 | 17,38 | 17,26 | 17,14 | 17,02 | 16,90 | 16,80 | 16,70 | 16,60 | 16,50 | 16,40 |
|       | Zwischenwerte |                   |  | 21,60 | 21,47 | 21,34 | 21,21 | 21,08 | 20,95 | 20,81 | 20,67 | 20,53 | 20,39 | 20,25 | 20,12 | 19,99 | 19,86 | 19,73 | 19,60 |
| 5     | Glas          | 10,6              | 1,590  | 25,10 | 24,96 | 24,82 | 24,68 | 24,54 | 24,40 | 24,24 | 24,08 | 23,92 | 23,76 | 23,60 | 23,44 | 23,28 | 23,12 | 22,96 | 22,80 |
|       | Zwischenwerte |                   |  | 30,50 | 30,32 | 30,14 | 29,96 | 29,78 | 29,60 | 29,40 | 29,20 | 29,00 | 28,80 | 28,60 | 28,41 | 28,22 | 28,03 | 27,84 | 27,65 |
| 6     | Glas          | 15,1              | 4,700  | 35,90 | 35,68 | 35,46 | 35,24 | 35,02 | 34,80 | 34,56 | 34,32 | 34,08 | 33,84 | 33,60 | 33,38 | 33,16 | 32,94 | 32,72 | 32,50 |
|       | Zwischenwerte |                   |  | 37,85 | 37,71 | 37,57 | 37,43 | 37,29 | 37,15 | 37,00 | 36,85 | 36,70 | 36,55 | 36,40 | 36,26 | 36,12 | 35,98 | 35,84 | 35,70 |
| 7     | Stahl         | 4,0               | 0,260  | 39,80 | 39,74 | 39,68 | 39,62 | 39,56 | 39,50 | 39,44 | 39,38 | 39,32 | 39,26 | 39,20 | 39,14 | 39,08 | 39,02 | 38,96 | 38,90 |
|       | Zwischenwerte |                   |  | 44,80 | 44,74 | 44,68 | 44,62 | 44,56 | 44,50 | 44,43 | 44,36 | 44,29 | 44,22 | 44,15 | 44,08 | 44,01 | 43,94 | 43,87 | 43,80 |
| 8     | Stahl         | 5,0               | 0,510  | 49,80 | 49,74 | 49,68 | 49,62 | 49,56 | 49,50 | 49,42 | 49,34 | 49,26 | 49,18 | 49,10 | 49,02 | 48,94 | 48,86 | 48,78 | 48,70 |
|       | Zwischenwerte |                   |  | 54,75 | 54,68 | 54,61 | 54,54 | 54,47 | 54,40 | 54,31 | 54,22 | 54,13 | 54,04 | 53,95 | 53,87 | 53,79 | 53,71 | 53,63 | 53,55 |
| 9     | Stahl         | 6,0               | 0,870  | 59,70 | 59,62 | 59,54 | 59,46 | 59,38 | 59,30 | 59,20 | 59,10 | 59,00 | 58,90 | 58,80 | 58,72 | 58,64 | 58,56 | 58,48 | 58,40 |
|       | Zwischenwerte |                   |  | 64,85 | 64,76 | 64,67 | 64,58 | 64,49 | 64,40 | 64,29 | 64,18 | 64,07 | 63,96 | 63,85 | 63,76 | 63,67 | 63,58 | 63,49 | 63,40 |
| 10    | Stahl         | 7,0               | 1,390  | 70,00 | 69,90 | 69,80 | 69,70 | 69,60 | 69,50 | 69,38 | 69,26 | 69,14 | 69,02 | 68,90 | 68,80 | 68,70 | 68,60 | 68,50 | 68,40 |

Abb. 13: Bestimmung der Fließgrenze in N/m<sup>2</sup> mit dem Kugelhärfengerät (DIN 4127:2014)

# 5 Viskosimetrie

## 5.1 Einleitung

Der Begriff Viskosität bezeichnet die Zähigkeit von Flüssigkeiten und Fluiden (DIN 1342-2:1986). Je dickflüssiger ein Fluid ist, desto höher ist seine Viskosität. Bei allen Strömungsvorgängen spielt die Viskosität eine wesentliche Rolle und in Produktions- und Verarbeitungsverfahren mit Wärme- und hydrodynamischen Transportprozessen ist ihre Kenntnis zur Dimensionierung von Apparaten und Aggregaten erforderlich.

Ohne Kenntnis der Viskosität können Transportvorgänge in Pumpen und Rohrleitungen, Mischvorgänge in Stoffsystemen und Wärmeaustauschvorgänge selbst in Motoren, nicht berechnet werden.

Die Viskosimetrie beschäftigt sich mit der experimentellen Ermittlung der Viskosität, wobei das Fließverhalten von fluiden Medien, in erster Linie vorwiegend flüssigen oder gasförmigen Stoffsystemen, untersucht wird. Daraus ergeben sich

- Fließ- bzw. Viskositätskurven
- Viskositäts-Temperatur-Kurven.

### 5.1.1 Theoretische Grundlagen

Nach DIN 1342:1986 Teil 2 ist Viskosität definiert als „*die Eigenschaft eines fließfähigen (vorwiegend flüssigen oder gasförmigen) Stoffsystems, bei einer Verformung eine Spannung aufzunehmen, die nur von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt*“. Die Spannung kann gleichermaßen als Ursache der Verformungsgeschwindigkeit betrachtet werden (DIN 1342-2:1986).

Ein Fluidfilm, welcher sich zwischen zwei parallel angeordneten Platten befindet, besteht aus unendlich dünnen laminaren Schichten. Sobald eine der beiden Platten bewegt wird, überträgt sie mittels Adhäsion den jeweiligen Impuls auf die angrenzende laminare Schicht, welche ihrerseits über Kohäsionskräfte einen schwächeren Impuls an die jeweils nächste laminare Schicht weitergibt, usw. So entsteht im Fluidfilm ein Schergefälle, das auch als Geschwindigkeitsgefälle oder Scherrate bezeichnet wird. (Gmehling & Brem 1996)

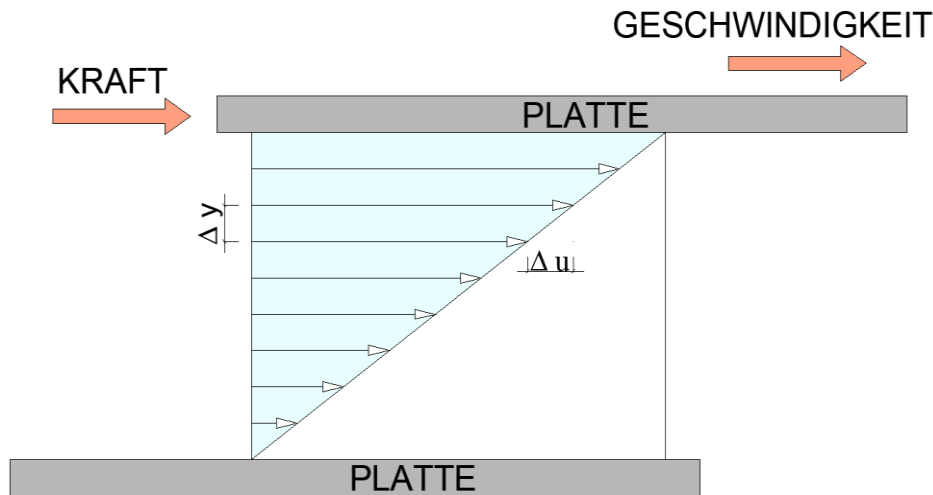


Abb. 14: Grundversuch der Viskosimetrie

Das Geschwindigkeitsgefälle  $D$  ist definiert als der Grenzwert des Quotienten aus der Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta u$  zwischen zwei benachbarten Schichten und ihrem Abstand  $\Delta y$  (DIN 1342-2:1986).

$$D = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

|     |            |                         |
|-----|------------|-------------------------|
| $D$ | $[s^{-1}]$ | Geschwindigkeitsgefälle |
| $v$ | $[m/s]$    | Geschwindigkeit         |
| $y$ | $[m]$      | Abstand                 |

Die Schubspannung  $\tau$  ist definiert als der Quotient aus der in Strömungsrichtung  $x$  wirkenden Kraft  $F$  und der Angriffsfläche  $A$  der Kraft. (DIN 1342-2:1986)

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4)$$

|        |           |               |
|--------|-----------|---------------|
| $\tau$ | $[N/m^2]$ | Schubspannung |
| $F$    | $[N]$     | Kraft         |
| $A$    | $[m^2]$   | Fläche        |

Nach dem „Newtonschen Gesetz“ der inneren Reibung eines fließfähigen Stoffsystems liegt folgender Zusammenhang zwischen dem Geschwindigkeitsgefälle  $D$  und der Schubspannung  $\tau$  vor:

$$\tau = \eta \times D \quad (5)$$

|        |                      |                         |
|--------|----------------------|-------------------------|
| $\tau$ | [N/m <sup>2</sup> ]  | Schubspannung           |
| $\eta$ | [Ns/m <sup>2</sup> ] | dynamische Viskosität   |
| $D$    | [s <sup>-1</sup> ]   | Geschwindigkeitsgefälle |

Die sich daraus ergebende Proportionalitätskonstante wird als dynamische Viskosität  $\eta$  bezeichnet und ist für newtonsche Flüssigkeiten eine stoffspezifische, aber temperaturabhängige, Konstante (DIN 1342-2:1986).

Es wird zwischen der kinematischen und der dynamischen Viskosität unterschieden. Die kinematische Viskosität  $\nu$  und die dynamische Viskosität  $\eta$  stehen in direktem Zusammenhang.

Der Quotient aus dynamischer Viskosität des Mediums  $\eta$  und seine Dichte  $\rho$  wird als kinematische Viskosität  $\nu$ .

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (6)$$

|        |                       |                         |
|--------|-----------------------|-------------------------|
| $\nu$  | [mm <sup>2</sup> /s]  | kinematische Viskosität |
| $\eta$ | [Ns/mm <sup>2</sup> ] | dynamische Viskosität   |
| $\rho$ | [g/cm <sup>3</sup> ]  | Dichte                  |

## 5.2 Ursachen und Einflussfaktoren der Viskosität

Die Viskosität jedes fluiden Systems entsteht durch auf molekularer Ebene stattfindende Wechselwirkungen. Die chemische Struktur einer Substanz bestimmt, welche Wechselwirkungen jeweils vorherrschen. So sind Van-der-Waals-Kräften ausschlaggebend für die Viskosität von Alkanen, (z.B. n-Hexan), während das Viskositätsverhalten von Wasser durch die Wasserstoffbrückenbindungen bestimmt wird. In makromolekularen Substanzen entstehen durch Verschlaufungen, Verfilzungen, o.ä., zusätzliche Kohäsionskräfte. (Kulicke 1986)

Mögliche Einflussparameter für die Viskosität ergeben sich direkt aus den Ursachen für das viskose Verhalten, wobei Druck, Temperatur, die Art der Substanz und ihre jeweilige Konzentration die wichtigsten sind. (M. Baerns 2013)

### 5.3 Thixotropes und rheopexes Verhalten

Zusätzlich zu den oben genannten Einflüssen ist eine zeitliche Änderung der Viskosität auch bei einer gleichbleibenden vorgegebenen Schergeschwindigkeit möglich. Eine über die Zeit geringer werdende Viskosität wird als thixotropes Verhalten bezeichnet. Vergrößert sich hingegen die Viskosität, dann nennt man dieses Verhalten rheopex (M. Baerns 2013). Die Ursache beider Vorgänge liegt darin, dass in der zu untersuchenden Substanz durch eine Beanspruchung Überstrukturen zerstört werden, welche sich jedoch nach Abschluss der Beanspruchungsphase wieder zurückbilden können. (Kulicke 1986)

Nicht zu verwechseln ist dieses Verhalten mit dilatantem oder strukturviskosem Verhalten bei dem die Höhe der entsprechenden Scherrate für die Änderung der Viskosität entscheidend ist, wohingegen sich Thixotropie oder Rheopexie durch zeitlich unterschiedliches Verhalten bei einer konstant bleibenden Scherrate kennzeichnen. (Kulicke 1986)

### 5.4 Newtonsche und nicht-newtonsche Flüssigkeiten

Unter einer newtonschen Flüssigkeit versteht man ein isotropes reinviskoses Fluid, für welches die Schubspannung  $\tau$  und das Geschwindigkeitsgefälle  $D$  proportional sind und die Gleichung  $\tau = \eta \times D$  in allen drei Koordinatenrichtungen gilt. Der Gültigkeitsbereich für diese Bezeichnung wird newtonscher Bereich genannt. (DIN 1342-2:1986)

Drei Klassen von Flüssigkeiten können unter dem Oberbegriff der nicht-newtonschen Flüssigkeiten zusammengefasst werden:

- nichtlinear - reinviskose
- linear - viskoelastische
- nichtlinear - viskoelastische Flüssigkeiten

Zu den nichtlinear-reinviskosen Flüssigkeiten gehören strukturviskose und dilatante Flüssigkeiten. Die Viskosität von strukturviskosen Flüssigkeiten verringert sich bei Zunahme der Schubspannung oder des Geschwindigkeitsgefälles. Im Gegensatz dazu steigt bei dilatanten Flüssigkeiten die Viskosität, wenn die Schubspannung oder das Geschwindigkeitsgefälle erhöht wird. (Holze R. et al. 2010)

Für diese strukturviskosen und dilatanten Flüssigkeiten kann eine scheinbare Viskosität  $\eta_a$  angegeben werden, die der Viskosität einer newtonschen Flüssigkeit mit gleichem Fließverhalten entspricht.

Von einem Bingham-Fluid wird gesprochen, wenn ein „starrer Körper“ bei Erreichen einer Mindestschubspannung, der Fließgrenze  $\tau_0$ , zu fließen beginnt und sich Proportionalität zwischen Geschwindigkeitsgefälle und Schubspannung einstellt. (Holze R. et al. 2010)

Die graphische Darstellung des Zusammenhanges zwischen der Schubspannung  $\tau$  und dem Geschwindigkeitsgefälle  $D$  einer Schichtenströmung bzw. eines plastischen Stoffes bei Überschreiten der Fließgrenze wird als Fließkurve bezeichnet. (Millow S. et al. 2005)

Die Viskositätskurve stellt die Scherviskositätsfunktion  $\eta = f(D)$  oder  $\eta = f(\tau)$  graphisch dar. (Millow S. et al. 2005)

Die Fließkurve wiederum veranschaulicht die Funktion  $\tau = f(D)$ . (Millow S. et al. 2005)

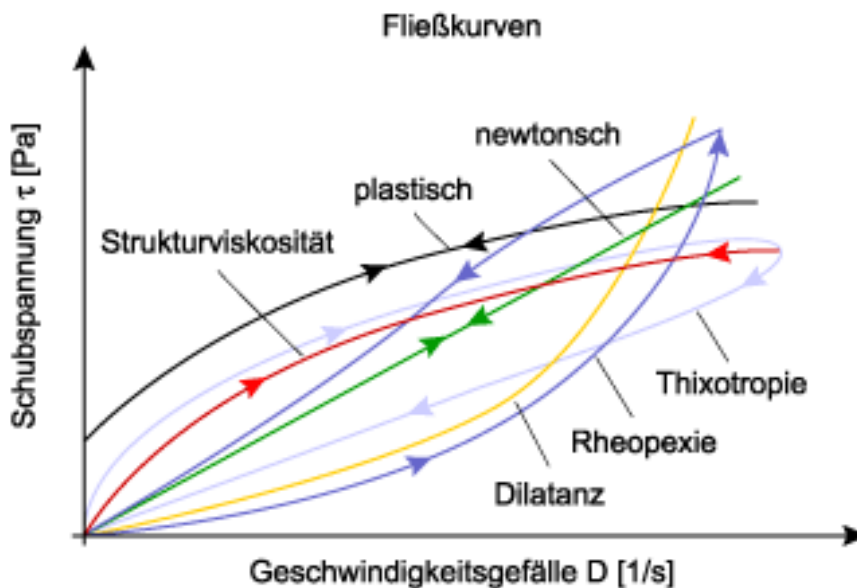


Abb. 15: Fließkurve (<https://roempp.thieme.de>)



## 5.5 Methoden zur Viskositätsmessung

Zur Bestimmung der Viskosität gibt es drei Messmethoden: die Kapillarviskosimetrie, die Kugelfallviskosimetrie und die Rotationsviskosimetrie. Welche der drei Methoden man nimmt, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Ein wesentliches Kriterium stellt die Prüfung der Substanz nach der Art des Fluids dar. Zudem eignen sich einfache Rotationsviskosimeter oder Schwerkraft-Kapillarviskosimeter um newtonsche Flüssigkeiten zu messen. Anders verhält es sich bei nicht-newtonsche Flüssigkeiten, da diese nur mit Rotationsviskosimetern gemessen werden können. Das Rotationsviskosimeter wird in Kapitel 6 näher erläutert.

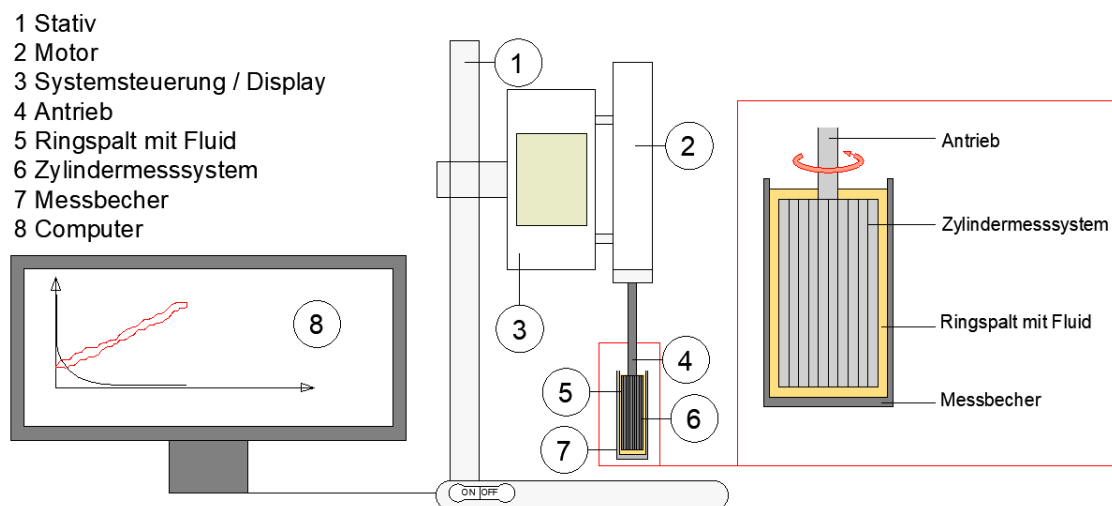


Abb. 16: Rotationsviskosimeter

## 6 Rotationsviskosimeter

Zur Messung der dynamischen Viskosität unter definiertem aber zeitlich variablem Geschwindigkeitsgefälle dient das Rotationsviskosimeter, welches sowohl für newtonsche als auch für nicht-newtonsche Flüssigkeiten geeignet ist. Das Messprinzip beruht auf dem bereits erwähnten Grundversuch der Viskosimetrie, wobei die parallelen Platten zu einem System von zwei coaxialen Zylindern umgeformt werden und sich die zu untersuchende Flüssigkeit im Ringspalt zwischen Innen- und Außenzylinder befindet. Die Scherung wird durch Rotation entweder des Innenzylinders (Searle - System) oder des Außenzylinders (Couette - System) erzeugt. Bei einer vorgegebenen Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  stellt sich durch den viskositätsbedingten Widerstand der gescherten Flüssigkeit ein zur Viskosität proportionales Drehmoment ein. Im Fall eines vorgegebenen Drehmoments ergibt sich eine zur Viskosität umgekehrt proportionale Winkelgeschwindigkeit. (DIN 53018-1:1976)

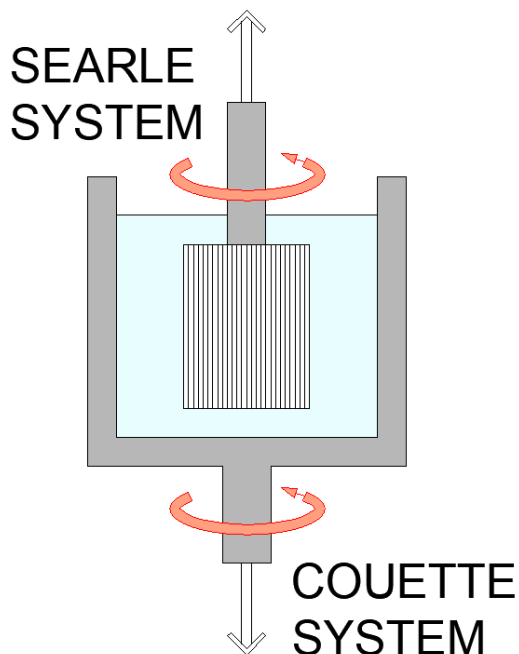


Abb. 17: Rotationsviskosimeter

Bei vorgegebener Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  ergibt sich das Geschwindigkeitsgefälle aus

$$D = \omega \cdot \frac{1 + \left(\frac{r_A}{r_I}\right)^2}{\left(\frac{r_A}{r_I}\right)^2 - 1} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (8)$$

|                |                    |                           |
|----------------|--------------------|---------------------------|
| D              | [s <sup>-1</sup> ] | Geschwindigkeitsgefälle   |
| ω              | [s <sup>-1</sup> ] | Winkelgeschwindigkeit     |
| r <sub>A</sub> | [mm]               | Radius des Außenzylinders |
| r <sub>I</sub> | [mm]               | Radius des Innenzylinders |
| n              | [s <sup>-1</sup> ] | Drehzahl                  |

$$\tau = \frac{M}{2\pi \cdot r_I^2 \cdot l} \quad (9)$$

|                |                      |                           |
|----------------|----------------------|---------------------------|
| τ              | [N/mm <sup>2</sup> ] | Schubspannung             |
| M              | [Nmm]                | Drehmoment                |
| r <sub>I</sub> | [mm]                 | Radius des Innenzylinders |
| l              | [mm]                 | Länge des Zylinders       |

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot D \quad (10)$$

|                |                       |                         |
|----------------|-----------------------|-------------------------|
| τ              | [N/mm <sup>2</sup> ]  | Schubspannung           |
| τ <sub>0</sub> | [N/mm <sup>2</sup> ]  | Fließgrenze             |
| η              | [Ns/mm <sup>2</sup> ] | dynamische Viskosität   |
| D              | [s <sup>-1</sup> ]    | Geschwindigkeitsgefälle |

# 7 Einaxiale Druckfestigkeit

## 7.1 Allgemeines

Der Einaxiale Druckversuch nach ISO 17892-7:2018 im Erd- und Grundbau dient der Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit  $q_u$  und des Elastizitätsmoduls  $E_u$ . Der Versuch wird an prismatischen oder zylindrischen Probekörpern durchgeführt. Die Probekörper werden weggesteuert mit konstanter axialer Stauchungsgeschwindigkeit belastet.

## 7.2 Durchführung und Auswertung der Versuche

Die Herstellung der Proben erfolgt entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 9. Die Proben werden bis zum jeweiligen Prüftermin unter Wasser gelagert. Ein wesentlicher Schritt vor der Durchführung des Versuches ist die Bestimmung der Dichte des Probekörpers nach ÖNORM B 4414-1:1976. Durch Ofentrocknung gemäß ÖNORM B 4410:2009 bei 105 °C wird nach dem Versuch der Wassergehalt bestimmt und anschließend die Trockendichte bestimmt.

Die Durchführung der einaxialen Druckversuche erfolgt mittels Universalprüfmaschine. Diese Prüfpresse verfügt über eine autonom arbeitende Prozessor-Einheit, eine Kraftmessdose und ist mit einem Computer verbunden. Somit wird der Versuch gesteuert und die Messwerte in entsprechenden Speicherintervallen werden aufgezeichnet. Da die Querschnittsfläche der Probekörper berücksichtigt wird, wird bei der Untersuchung der Spannungen eine Genauigkeit von 10 kN/m<sup>2</sup> gewährleistet. Kraft, Dauer des Versuches und Verschiebung werden während des Versuches erfasst und geben Aufschluss über die Belastbarkeit und damit über die empfohlenen Einsatzbereiche eines Bodens. Etwaige Abweichungen in der Endflächenparallelität der Probe werden aufgrund einer Druckplatte, die mit einem Kugelgelenk ausgestattet ist, ausgeglichen. Zusätzlich wird der Probekörper mit einem Plastiksack vor dem Austrocknen geschützt, was insbesondere bei langsamen Prüfgeschwindigkeiten vorkommen kann.

Die Durchführung der einaxialen Druckversuche erfolgt gemäß ISO 17892-7:2018 „Einaxialer Druckversuch“ mit gleichbleibender Verformungsgeschwindigkeit von  $v = 0,2$  % der Probenausgangshöhe pro Minute.

Die Bruchspannung beziehungsweise die einaxiale Druckfestigkeit  $q_u$  stellen die Kenngröße dar und werden nach ISO 17892-7:2018 als der Höchstwert der einaxialen Druckspannung  $\max. \sigma_v$  definiert (ISO 17892-7:2018). Ist die einaxiale Druckfestigkeit erreicht, so entstehen vertikale Risse, welche mit dem Bruch der Probe korrelieren.

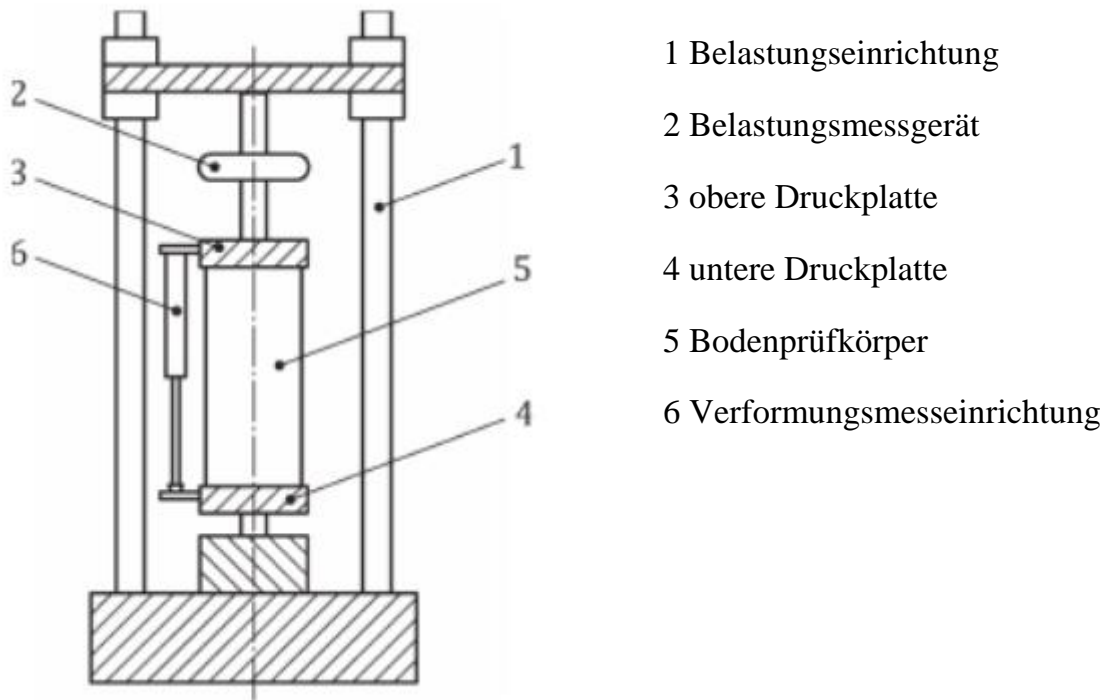


Abb. 18: Einaxialer Druckversuch (ISO 17892-7:2018)

Die vertikale Stauchung  $\varepsilon_v$  ist der Quotient aus der Änderung der Höhe des Probekörpers  $\Delta H$  und der Anfangshöhe des Probekörpers  $H_i$ .

$$\varepsilon_v = \frac{H_i}{\Delta H} \quad (11)$$

|                 |      |  |
|-----------------|------|--|
| $\varepsilon_v$ | [-]  | vertikale Stauchung                        |
| $H_i$           | [cm] | Ausgangsprobenhöhe                         |
| $\Delta H$      | [cm] | Höhenänderung des Probekörpers unter Druck |

Zur Berechnung der vertikale Spannung wird folgende Formel verwendet:

$$\sigma_v = \frac{P}{A_i / (1 - \varepsilon_v)} \quad (12)$$

|                 |                     |  |
|-----------------|---------------------|--|
| $\sigma_v$      | [N/m <sup>2</sup> ] | vertikale Spannung auf dem Probekörper     |
| P               | [N]                 | Vertikallast auf dem Probekörper           |
| $A_i$           | [m <sup>2</sup> ]   | Anfangsquerschnittsfläche des Probekörpers |
| $\varepsilon_v$ | [-]                 | vertikale Stauchung                        |

### 7.3 Einflussfaktoren auf die Parameter

Grundsätzlich wird die einaxiale Druckfestigkeit an zylindrischen Proben, welche 28 Tage alt sind und bei 20 °C in Wasser gelagert wurden, bestimmt. Frühere Untersuchungen widmeten sich außerdem den Einflüssen auf die Entwicklung der Druckfestigkeit einer zementbasierten Suspensionenmasse. Tabelle 1 gibt einen Überblick über Einflussfaktoren auf die einaxiale Druckfestigkeit, wobei 4 Kategorien unterschieden werden. Dazu zählen die Ausgangskomponenten, die Aufbereitungsart, die Lagerungsbedingungen der Probekörper und Versuchsdurchführung. (Schulz 2001)

Tab. 1: Einflussfaktoren; In Anlehnung an Schulz, 2001

| Kategorie                   | Einflussfaktoren          |                            |              |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------|
| <b>Ausgangskomponente</b>   | Zement- und Bentonitsorte | Zement- und Bentonitanteil | Mahlfeinheit |
| <b>Aufbereitungsart</b>     | Rührzeit                  | Rührgeschwindigkeit        | Ruhephase    |
| <b>Lagerungsbedingungen</b> | Lagerungstemperatur       | Probenalter                | unter Wasser |
| <b>Versuchsdurchführung</b> | Probekörper               | Belastungsgeschwindigkeit  |              |

## 7.4 Untersuchungen der Probengeometrie

Der Einfluss der Prüfkörperschlankheit auf die einaxiale Druckfestigkeit wurde 1987 von MESECK nachgewiesen. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 19 dargestellt. Sind die Proben gedrunen, so herrscht aufgrund der Endflächenreibung ein mehraxialer Spannungszustand. Nimmt die Schlankheit zu, so nähert sich der mehraxiale einem einaxialen Spannungszustand. Deshalb weisen gedrungene Probekörper eine höhere Festigkeit als schlanke auf.

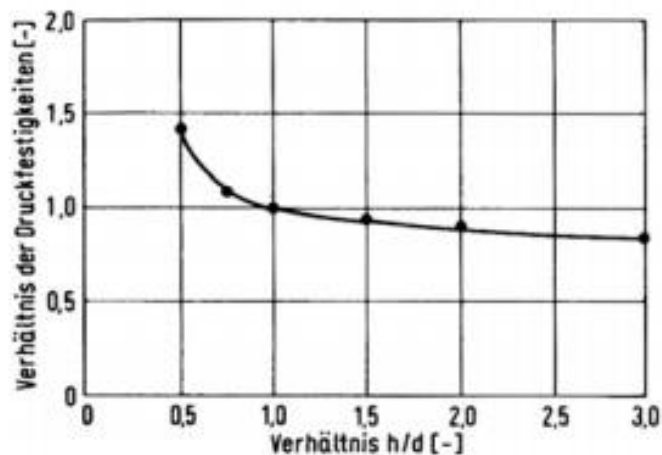


Abb. 19: Einfluss der Probekörperschlankheit auf die Einaxiale Druckfestigkeit von Dichtwandmassen (Meseck 1987)

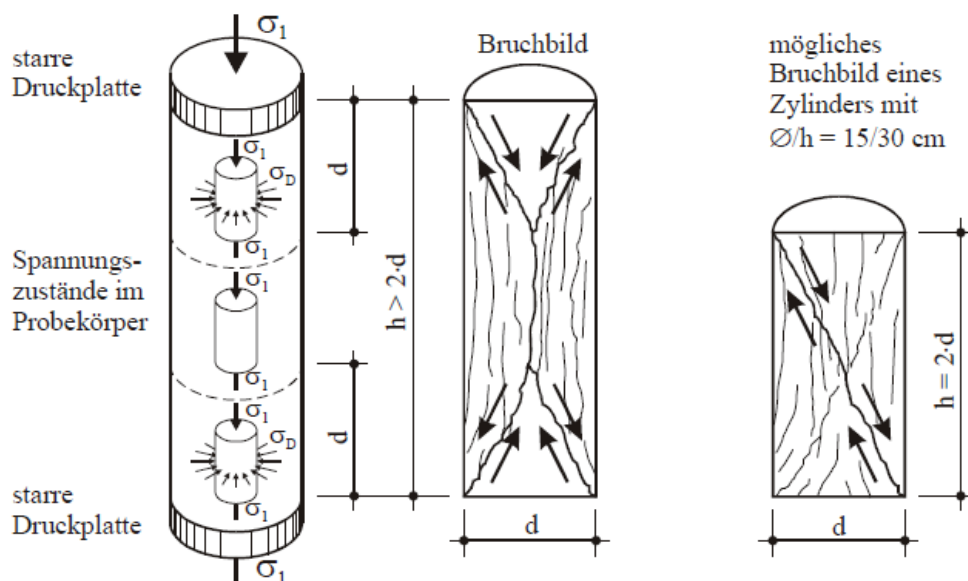


Abb. 20: Spannungszustände an einem Zylinder bei einem einaxialem Druckversuch (Hampel 2006)

In Abbildung 20 ist dieses Verhalten am Beispiel eines einaxialen Zylinderdruckversuchs dargestellt. Beispielsweise besitzen Probekörper mit einer Schlankheit von  $h/d = 2 \approx 90\%$  der einaxialen Druckfestigkeit von Prüfkörpern mit einer Schlankheit von  $h/d = 1$ .

## 7.5 Empfehlungen zur Durchführung von einaxialen Druckversuchen

Trotz gleicher Herstellung und Versuchsdurchführung kann es bei den Versuchsergebnissen zu Streuungen kommen. Nachfolgend sollen Empfehlungen erläutert werden, die eine solche Varianz der Versuchsergebnisse geringhalten sollen. Eine identische Herstellung, wie beispielsweise gleiches Mischungsverhältnis und planparallele Endflächen, minimieren die Streuung. Außerdem führt die Verwendung von Schalkörpern mit identischem Füllungsgrad ebenfalls zur Verringerung der Varianzen. Weiters ist eine dauerhafte und erschütterungsfreie Lagerung der Probekörper unter Wasser bei ca. 20 °C empfehlenswert. Der Druckstempel sollte beweglich gelagert werden. Die Aufnahme der Messwerte sollte in Speicherintervallen erfolgen. Zudem verringert die Schlankheit der Probekörper ( $h/d = 2$ ) beziehungsweise eine minimale Schlankheit  $h/d = 1$  die Streuung. Zu empfehlen sind außerdem mindestens drei Teilversuche mit denselben Randbedingungen bei Angabe eines Ergebnisses. (Schulz 2001)



# 8 Durchlässigkeit

## 8.1 Allgemeines

Wasserbewegungen hängen grundsätzlich vom Potentialgefälle und der Wasserleitfähigkeit ab. Zur Beschreibung der Wasserdurchlässigkeit eines Bodens dient der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$ . Der Durchlässigkeitsbeiwert kann durch verschiedene Versuche im Labor oder in situ bestimmt werden und wird z.B. zum Abschätzen von Grundwasserströmungen, für Grundwasserspiegelberechnungen oder für Durchlässigkeitsbeurteilungen von Dichtschichten im Deponiebau verwendet.

Tab. 2: Relevante Durchlässigkeitsbereiche (ÖNORM B 4422-1:1992)

| <b>k [m/s]</b>             | <b>Durchlässigkeit</b> |
|----------------------------|------------------------|
| $k \leq 10^{-8}$           | sehr gering            |
| $10^{-8} < k \leq 10^{-6}$ | gering                 |
| $10^{-6} < k \leq 10^{-4}$ | mittel                 |
| $10^{-4} < k \leq 10^{-2}$ | stark                  |
| $10^{-2} \leq k$           | sehr stark             |

In dieser Arbeit wird der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_{10}$  verwendet, welcher definiert ist als die Filtergeschwindigkeit, mit der Wasser mit einer Temperatur von 10 °C aufgrund eines konstanten hydraulischen Gefälles eine Probe durchfließt.

Das hydraulische Gefälle berechnet sich aus dem hydraulischen Höhenunterschied  $h_w$  bezogen auf die durströmte Länge des Probekörpers  $l$ : (Glg.(13))

$$i = \frac{h_w}{l} \quad (13)$$

|       |     |                        |
|-------|-----|------------------------|
| $i$   | [-] | hydraulisches Gefälle  |
| $h_w$ | [m] | hydraulische Druckhöhe |
| $l$   | [m] | Länge des Probekörpers |

Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  definiert sich basierend auf dem Darcy'schen Filtergesetz.

$$k = \frac{v}{i} \quad (14)$$

|     |       |                         |
|-----|-------|-------------------------|
| $v$ | [m/s] | Filtergeschwindigkeit   |
| $k$ | [m/s] | Durchlässigkeitsbeiwert |
| $i$ | [-]   | hydraulisches Gefälle   |

Hierbei beschreibt die Filtergeschwindigkeit  $v$  den Wasserdurchfluss pro Flächeneinheit. Der vorhandene Fließquerschnitt der Porenkanäle ist jedoch nur ohne zusätzliche Versuche zu ermitteln, deshalb wird der Durchfluss auf den gesamten Querschnitt der Probe bezogen. Somit ergibt sich für die angenommene Filtergeschwindigkeit  $v$  ein fiktiver Wert, der geringer ist als die vorhandene Strömungsgeschwindigkeit (OMERACI 1998).

$$v = k \times i = k \times \frac{h_w}{l} = \frac{Q}{A} \quad (15)$$

|       |                     |                                  |
|-------|---------------------|----------------------------------|
| $v$   | [m/s]               | Filtergeschwindigkeit            |
| $k$   | [m/s]               | Durchlässigkeitsbeiwert          |
| $i$   | [-]                 | hydraulisches Gefälle            |
| $h_w$ | [m]                 | hydraulische Druckhöhe           |
| $l$   | [m]                 | Länge des Probekörpers           |
| $Q$   | [m <sup>3</sup> /s] | Durchflussvolumen je Zeiteinheit |
| $A$   | [m <sup>2</sup> ]   | Querschnittsfläche der Probe     |

Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes erfolgt unter Berücksichtigung der Menge  $Q$  und der Temperatur  $\vartheta$  des durchströmenden Wassers, der Probenfläche  $A$ , des hydraulischen Gefälles sowie der Durchströmungsdauer  $t$  während des Versuchs. Die Dichte und die Zähigkeit des Wassers sind temperaturabhängig, deshalb geht in die Berechnung ein Faktor  $\alpha$  ein, der zur Umrechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes auf eine einheitliche Temperatur von 10 °C dient.

Somit errechnet sich der Durchlässigkeitsbeiwert nach POISEUILLE (ÖNORM B 4422-1:1992) zu:

$$k_{10} = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \times \vartheta + 0,00022 \times \vartheta^2} \times k_{\vartheta} = \alpha \times k_{\vartheta} \quad (16)$$

|                 |       |  |
|-----------------|-------|--|
| $k_{10}$        | [m/s] | Durchlässigkeitsbeiwert bei einer Normtemperatur von 10°C  |
| $\vartheta$     | [°C]  | tatsächliche Wassertemperatur                              |
| $k_{\vartheta}$ | [m/s] | Durchlässigkeitsbeiwert bei tatsächlicher Wassertemperatur |
| $\alpha$        | [-]   | Temperaturkorrekturbeiwert                                 |

Tab. 3: Korrekturbeiwert  $\alpha$  zur Berücksichtigung der temperaturabhängigen Zähigkeit des Wassers (ÖNORM B 4422-1:1992)

| $\vartheta$ [°C]         | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Korrekturfaktor $\alpha$ | 1,158 | 1,000 | 0,874 | 0,771 | 0,686 |

Je nach Versuchsart und Bedingungen kann die Streubreite zwischen den Versuchsergebnissen groß sein und bis zu einer Zehnerpotenz betragen. In dieser Arbeit wird der Durchlässigkeitsbeiwert überwiegend in Triaxialzellen ermittelt. Weiters dürfen sich bestimmte Faktoren, wie Korngefüge, während des Versuches nicht verändern. (Schulz 2001)

## 8.2 Versuchsgrundlagen gemäß ÖNORM B 4422-1:1992

Um den Durchfluss und das hydraulische Gefälle an der zu untersuchenden Bodenprobe zu messen, ist eine geeignete Versuchsanordnung entsprechend dem Korngefüge und der Korngrößenverteilung des Bodens zu wählen. Außerdem müssen Dichte, Wasserbeschaffenheit und Porenraumsättigung berücksichtigt werden und möglichst den Verhältnissen im Feld entsprechen, da sie das Messergebnis beeinflussen. Im Versuchsbericht sind diese Werte zu erwähnen und bei der Interpretation der Messergebnisse in Betracht zu ziehen.

Die Mindestabmessungen der Proben werden durch die Korngröße bestimmt. In der Regel sind feinkörnige Proben geringer durchlässig als grobkörnige. Eine ungleichförmige Probe besitzt bei gleichem Korndurchmesser  $d_{10}$  und sonst gleichen Verhältnissen eine geringere Durchlässigkeit als eine gleichförmige. Außerdem

kann die Durchlässigkeit durch kolloidale Eigenschaften des Feinkorns vermindert werden.

Bei fein- und gemischtkörnigen Böden mit Krümelstruktur ist aufgrund der Grobporen die Durchlässigkeit höher als bei homogener Körnerverteilung.

Eine richtungsabhängige Durchlässigkeit ergibt sich bei geschichteten Böden oder plattigen oder stabförmigen Körnern mit bevorzugter Ausrichtung, wobei die Durchlässigkeit senkrecht zur Schichtung oder Kornausrichtung am geringsten ist. Die Dichte der Probe muss während der Durchströmung konstant bleiben. Soll der Einfluss der Dichte auf die Durchlässigkeit untersucht werden, dann sind mindestens drei Durchströmungsversuche mit unterschiedlichen Porenzahlen (Trockendichten) des Probekörpers erforderlich. Bei gleicher Korngrößenverteilung nimmt die Durchlässigkeit mit zunehmender Dichte ab.

Das im Versuch verwendete Wasser sollte dem Porenwasser möglichst ähnlich sein. Es darf im Probekörper weder Bestandteile herauslösen noch gelöste oder schwebende Teile ablagern. Meist genügt entlüftetes Leitungswasser, in besonderen Fällen muss es jedoch eigens beschafft oder aufbereitet werden (z.B. Meeressedimente).

Die Sättigungszahl ( $S_r = 1$ ) muss während der Messung konstant bleiben, oder bei Wiederholung der Messung mit gleichem hydraulischem Gefälle darf sich das Messergebnis nicht mehr ändern. Das trifft bei konstantem Druck und konstantem Gefälle zu, wenn die ein- und ausströmenden Wassermengen gleich sind.

Die Durchlässigkeit eines Bodens hängt von der Sättigung ab und ist im Allgemeinen umso höher, je höher die Sättigung ist.

Die Wahl des hydraulischen Gefälles darf nach praktischen Gesichtspunkten erfolgen, solange das Fließgesetz von Darcy im linearen Bereich eingehalten wird und das Korngefüge sich nicht verändert. Die Durchströmung darf keine Konsolidierung oder Schwellung des Probekörpers hervorrufen.

Die Fließgeschwindigkeit des Wassers und damit der  $k$ -Wert sind bei gleichbleibendem Gefälle temperaturabhängig, da sich die Zähigkeit des Wassers mit der Temperatur ändert.

Während der Messphase ist die Raumtemperatur konstant zu halten und die Temperatur des Wassers und des Probekörpers muss sich an diese angepasst haben.

Der im Versuch ermittelte  $k$ -Wert muss auf eine Referenztemperatur von 10 °C umgerechnet werden.

Um den Einfluss von Inhomogenitäten des Probekörpers auf das Messergebnis zu vermeiden, muss dieser über gewisse Mindestabmessungen verfügen. Proben-durchmesser und Probenhöhe sollten bei ungleichförmigen Böden mindestens das

Fünffache und bei gleichförmigen Böden mindestens das Zehnfache der Größtkornabmessungen betragen. Die Querschnittsfläche sollte bei bindigen Böden mindestens  $A = 10 \text{ cm}^2$  und bei grobkörnigen Böden mindestens  $A = 20 \text{ cm}^2$  betragen.

Zur Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes ist die entsprechende Wassermenge bei stationärer Strömung zu messen. Ein Vergleich der ein- und ausströmenden Wassermengen dient zur Kontrolle des stationären Strömungszustandes. Wenn bei konstantem Strömungsgefälle die pro Zeiteinheit ein- oder ausfließenden Wassermengen konstant bleiben, so deutet dies auf einen stationären Strömungszustand hin. In Einzelfällen kann der Nachweis des stationären Strömungszustandes äußerst aufwändig sein, insbesondere bei sehr kleinen Wassermengen im Falle von Böden mit sehr geringer Durchlässigkeit.

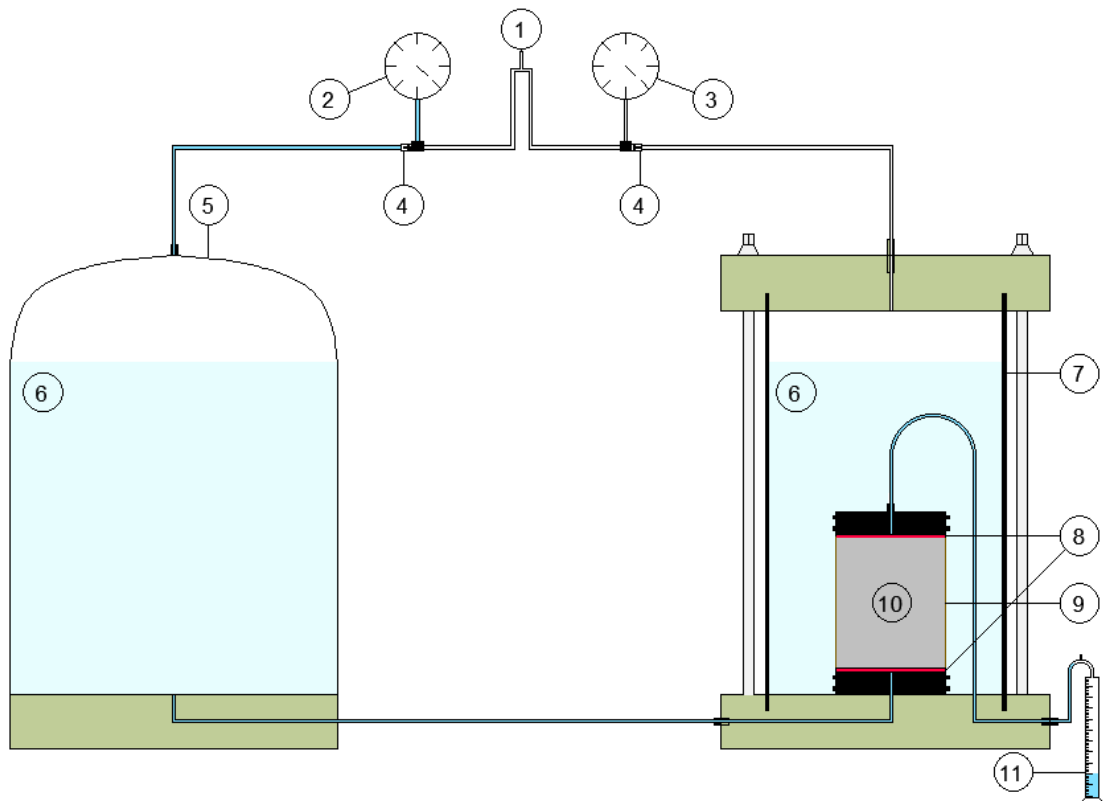
Bei größeren durchströmenden Wassermengen und konstantem hydraulischem Gefälle erfolgt eine Messung des unterwasserseitig überlaufenden Wassers.

Im Falle von sehr geringen Wassermengen wird die Messung mittels Piezometern, Büretten oder kalibrierten Glaskapillaren durchgeführt, wobei als Marke jeweils eine von der Strömung mitgeführte Luftblase dient. Bei sehr geringen Wassermengen kann das Messergebnis durch Verdunstung beeinträchtigt werden, was eventuell durch Erhöhung des hydraulischen Gefälles minimiert werden kann.

## **8.3 Versuchseinrichtung**

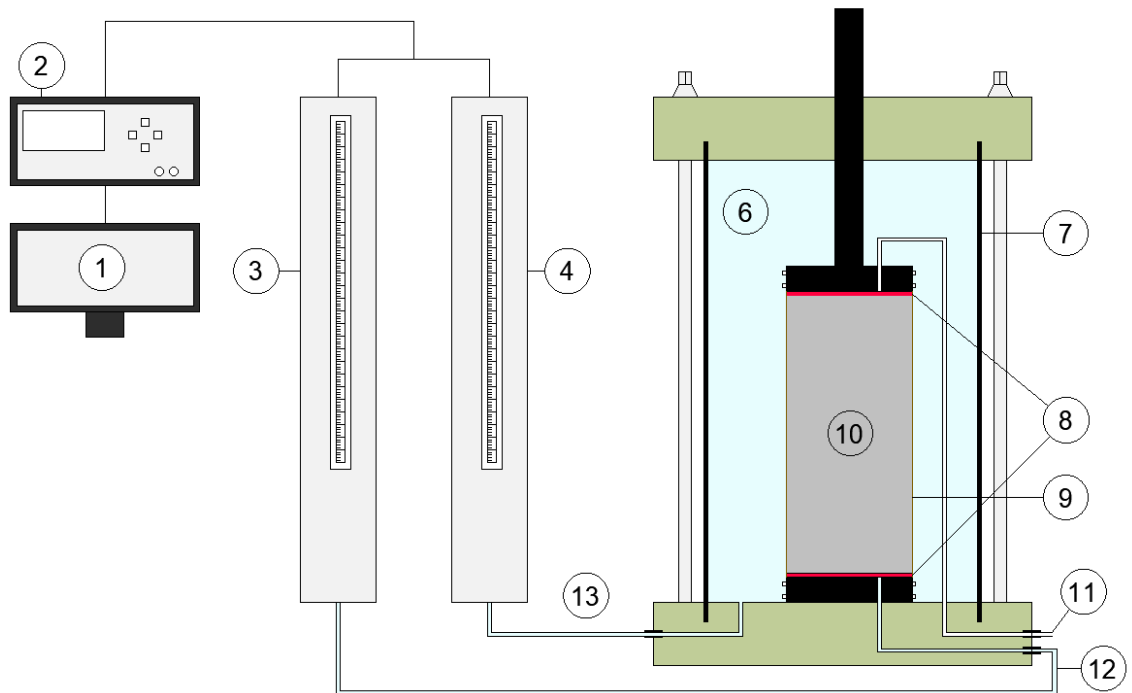
### **8.3.1 Triaxialzelle & Triaxialgerät gemäß ÖNORM B 4422 – 1:1992**

Die Durchführung des Versuches erfolgt in der Regel mit einer Anordnung für konstantes hydraulisches Gefälle. Das verwendete Versuchsgerät ermöglicht einen konstanten Wasserdruck in der Triaxialzelle und verfügt über dem vorhandenen Größtkorn entsprechende Abmessungen. Eine Gummihülle umschließt den Probekörper, welcher an der Ober- und Unterseite jeweils durch einen Filterstein begrenzt wird. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Durchlässigkeit der Filtersteine muss ihr Durchlässigkeitsbeiwert mindestens um das Zehnfache höher sein als jener des Probekörpers. Auf der Oberseite dient eine Druckplatte zur Aufbringung der Last. Die Zusammendrückung des Probekörpers in axialer Richtung wird mithilfe einer Messuhr ermittelt. Zur Entlüftung und um eine gleichmäßige Durchströmung sicherzustellen muss sowohl am Probensockel als auch am Kopfstück eine spiralförmige Rille vorhanden sein (DIN 18130-1:1998). Ein mit entlüftetem Wasser beschickter Druckerzeuger gibt dieses unter konstantem Druck an den Probekörper ab. Die Durchströmung des Probekörpers erfolgt von unten nach oben. Der Zelldruck in der Gummihülle muss größer sein als der Oberwasserdruck und groß genug sein um im Einströmungsbereich die Bruch-sicherheit des Probekörpers zu gewährleisten. Zelldruck und Axiallast müssen während der Probe konstant bleiben. Der Oberwasserdruck wird mittels Druckluft erzeugt. Der Unterwasserspiegel muss höher liegen als die Oberseite des Probekörpers. Ein Messzylinder dient zur Ermittlung der durchströmenden Wassermenge (DIN 18130-1:1998).



- |   |                              |    |               |
|---|------------------------------|----|---------------|
| 1 | Kompressor                   | 7  | Zellmantel    |
| 2 | Durchströmungsdruck          | 8  | Filterstein   |
| 3 | Zelldruck                    | 9  | Latex Membran |
| 4 | Druckregler                  | 10 | Probe         |
| 5 | Kunststoff Druckluftbehälter | 11 | Messglas      |
| 6 | Zellenflüssigkeit (Wasser)   |    |               |

Abb. 21: Versuchsaufbau in der Triaxialzelle mit isotroper statischer Belastung



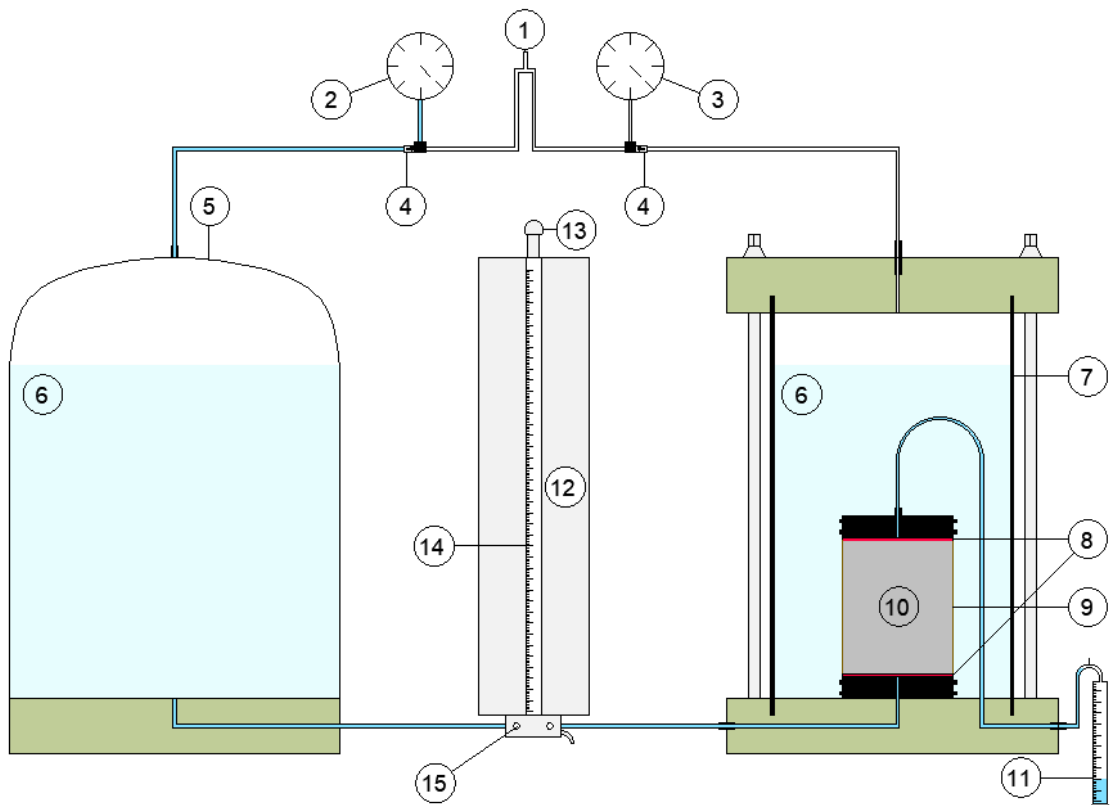
- |   |                                    |    |               |
|---|------------------------------------|----|---------------|
| 1 | Computer                           | 8  | Filterstein   |
| 2 | Elektropneumatische Drucksteuerung | 9  | Latex Membran |
| 3 | Volumenstromerzeuger               | 10 | Probe         |
| 4 | Druckstromerzeuger                 | 11 | Dränage       |
| 5 | Laststempel                        | 12 | Porendruck    |
| 6 | Zellenflüssigkeit (Wasser)         | 13 | Zelldruck     |
| 7 | Zellmantel                         |    |               |

Abb. 22: Triaxialversuch



### 8.3.2 Kapillarmessung für $k < 10^{-10}$

Das Volumen des durchströmenden Wassers wird mittels Messung der Geschwindigkeit einer kleinen injizierten Luftblase bestimmt, die sich in einer Messkapillare bewegt. Die Messkapillare verfügt über einen Innendurchmesser von 1 mm bis 2 mm bei einer Messlänge von 200 mm (ÖNORM B 4422-1:1992).



- |    |                              |    |   |
|----|------------------------------|----|---|
| 1  | Kompressor                   | 11 | Messglas  |
| 2  | Durchströmungsdruck          | 12 | Vorrichtung zur Messung<br>kleinste Wasservolumen |
| 3  | Zelldruck                    | 13 | Entlüftung  |
| 4  | Druckregler                  | 14 | Kalibrierte Meßkapillar                           |
| 5  | Kunststoff Druckluftbehälter | 15 | Luftzufuhr  |
| 6  | Zellenflüssigkeit (Wasser)   |    |   |
| 7  | Zellmantel                   |    |   |
| 8  | Filterstein                  |    |   |
| 9  | Latex Membran                |    |   |
| 10 | Probe                        |    |   |

Abb. 23: Vorrichtung zur Messung kleinste Wasservolumen

## 9 Herstell- und Prüfverfahren von zementbasierten Suspensionen

Für die Herstellung von Proben ist ein Ablauf verschiedener Arbeitsschritte notwendig. Zunächst wird das Anmachwasser temperiert, danach wird das Bentonit eingerührt. Das Dispergieren wird mittels Ultra –Turrax T 50 (5000 U/min) durchgeführt. Daraufhin lässt man Bentonit im Ruhezustand für eine Minute aufquellen. Im nächsten Schritt wird Zement in die Bentonitsuspension eingerührt. Anschließend wird die Suspension einem Mischvorgang unterzogen (5 Minuten bei 5000 U/min mittels Ultra-Turrax T50). Sobald der Mischvorgang beendet ist, werden die rheologischen Suspensionskennwerte ermittelt.



Abb. 24: Hochleistungs-Dispergiergerät ULTRA - TURRAX T 50

Die Suspension wird schließlich in Schalkkörper eingefüllt und bei entsprechender Temperatur gelagert. Bei den Schalkkörpern handelt es sich um Kunststoffrohre mit planparallelen Enden. Je nach Versuch wird die Höhe der Schalkkörper

$12 < h_s < 24$  cm gewählt. Die Kunststoffrohre werden mit einer Endkappe verschlossen, wobei die Endkappe ein Ausfließen der Suspension verhindert. Ist die Lagerungszeit von mindestens 3 Tagen beendet, werden die Probekörper ausgeschalt.

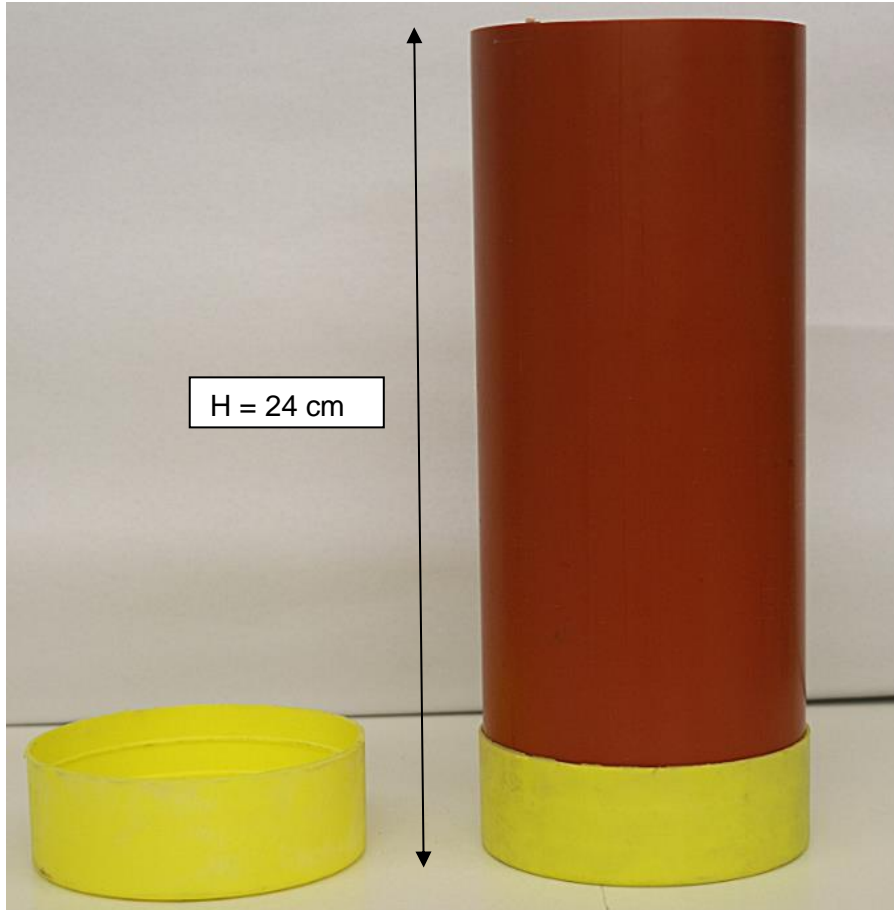


Abb. 25: Kunststoffrohr mit Endkappe

Grundsätzlich kommt nur eine Art von zementgebundene Injektionsmittel zur Prüfung, welche mit unterschiedlichen W/Z Werten angemischt wurde. Für das Versuchsprogramm wurde ein hochwertiger Natriumbentonit der Firma Tiwo und Höchswertzement der Firma Lafarge ausgewählt. Die Ausgangsstoffe mit ihren wichtigsten Eigenschaften sind in der Tabelle 4 und 5 aufgelistet.

Tab. 4: Technische Daten „Tiwonit S“

| <b>Mineralogische Zusammensetzung</b> |            |                     |
|---------------------------------------|------------|---------------------|
| Montmorillonit                        | $\geq 70$  | [%]                 |
| Quarz                                 | $\leq 5$   | [%]                 |
| Andere Tonminerale                    | $\leq 30$  | [%]                 |
| <b>Technische Durchschnittswerte</b>  |            |                     |
| Korndichte (DIN 18124)                | 2,65       | [t/m <sup>3</sup> ] |
| Wassergehalt (DIN 18121)              | $10 \pm 2$ | [%]                 |
| Schüttdichte (DIN 53466)              | 0,8        | [t/m <sup>3</sup> ] |
| Quellvolumen (2 g/100 ml)             | $\geq 25$  | [ml]                |

Tab. 5: Technische Daten EN 197-1-CEM I 52,5 R „Der Blaue“

| <b>Technische Durchschnittswerte</b> |      |                       |
|--------------------------------------|------|-----------------------|
| Dichte                               | 3,11 | [kg/dm <sup>3</sup> ] |
| Druckfestigkeit nach 28 Tage         | 64   | [N/mm <sup>2</sup> ]  |
| Erstarrungbeginn bei 20°C            | 100  | [min]                 |
| Mahlfeinheit                         | 4900 | [cm <sup>2</sup> /g]  |

$$V_{\text{susp}} = \frac{W}{\rho_w} + \frac{Z}{\rho_z} + \frac{B_e}{\rho_{Be}} \quad (17)$$

|                   |                      |                         |
|-------------------|----------------------|-------------------------|
| $V_{\text{susp}}$ | [cm <sup>3</sup> ]   | Suspensionsvolumen      |
| W                 | [g]                  | Wassers                 |
| Z                 | [g]                  | Zement                  |
| $B_e$             | [g]                  | Bentonit                |
| $\rho_w$          | [g/cm <sup>3</sup> ] | Dichte des Wassers      |
| $\rho_z$          | [g/cm <sup>3</sup> ] | korndichte des Zementes |
| $\rho_{Be}$       | [g/cm <sup>3</sup> ] | korndichte Bentonit     |

Ist der Prozess des Anmischens beendet, werden die rheologischen Kenngrößen sowie die Temperatur, der pH Wert, die Fließgrenze usw. der Suspension untersucht. Innerhalb dieser Arbeit dienen die Suspensionskennwerte sowohl der Überprüfung des Mischungsverhältnisses als auch der eingesetzten Komponenten.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die jeweiligen Untersuchungen und deren bau-relevanten Bedeutungen.

Tab. 6: Methoden und Kenngrößen zur charakterisierung der rheologischen Eigenschaften, In Anlehnung an Schulz, 2001

| <b>Parameter</b>    | <b>Auswirkung</b>        | <b>Prüfverfahren</b> | <b>Einheit</b>       |
|---------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| Dichte              | Mischungsverhältnisse    | Spülmilchwaage       | [g/cm <sup>3</sup> ] |
| Auslaufzeit         | Ausbreitung/Reichweite   | Marshtrichter        | [s]                  |
| Absetzmaß           | Sedimentation            | Standzylinder        | [%]                  |
| Fließgrenze         | Ausbreitung/Reichweite   | Kugelharfe           | [N/m <sup>2</sup> ]  |
| Filtratwasserabgabe | Filtration               | Filterpresse         | [cm <sup>3</sup> ]   |
| pH Wert             | Konzentration            | pH-Meter             | [-]                  |
| Temperatur          | Reaktionsgeschwindigkeit | pH-Meter             | [°C]                 |

# 10 Laboruntersuchungen

## 10.1 Dichte der Suspensionen

Aus der Dichte der Suspension lässt sich erkennen, ob die Mischungsverhältnisse den Vorgaben entsprechen und ob im Injektionsgut durch den Mischprozess unerwünschte Einflüsse wie zum Beispiel Lufteintrag vorhanden sind. Die Suspensionsdichte kann mittels Messzylinder, Spülungswaage oder Aräometer gemessen werden. (Kainrath 2017)

Die Soll-Dichte der Suspension  $\rho_{\text{susp}}$  in Abhängigkeit vom W/Z-Wert beträgt:

$$\rho_{\text{susp}} = \frac{\frac{W}{Z} + 1}{\frac{W}{Z} \times \frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_z}} \quad (18)$$

|                      |                      |                         |
|----------------------|----------------------|-------------------------|
| $\rho_{\text{susp}}$ | [g/cm <sup>3</sup> ] | Suspensionsdichte       |
| $\rho_w$             | [g/cm <sup>3</sup> ] | Dichte des Wassers      |
| $\rho_z$             | [g/cm <sup>3</sup> ] | Korndichte des Zementes |
| W/Z                  | [-]                  | Wasserzementwert        |

In Abbildung 26 ist die Suspensionsdichte in Abhängigkeit vom W/Z-Wert dargestellt. Die Korndichte  $\rho_z$  beträgt dabei 3,1g/cm<sup>3</sup>. Aufgrund des unvollständigen Verbunds der Zementkörner im Zuge der Hydratation ergeben sich in der Praxis niedrigere Werte als in der Berechnung.

Die Obergrenze kann mit 1,74 g/cm<sup>3</sup> und die Untergrenze mit 1,29 g/cm<sup>3</sup> beschrieben werden.

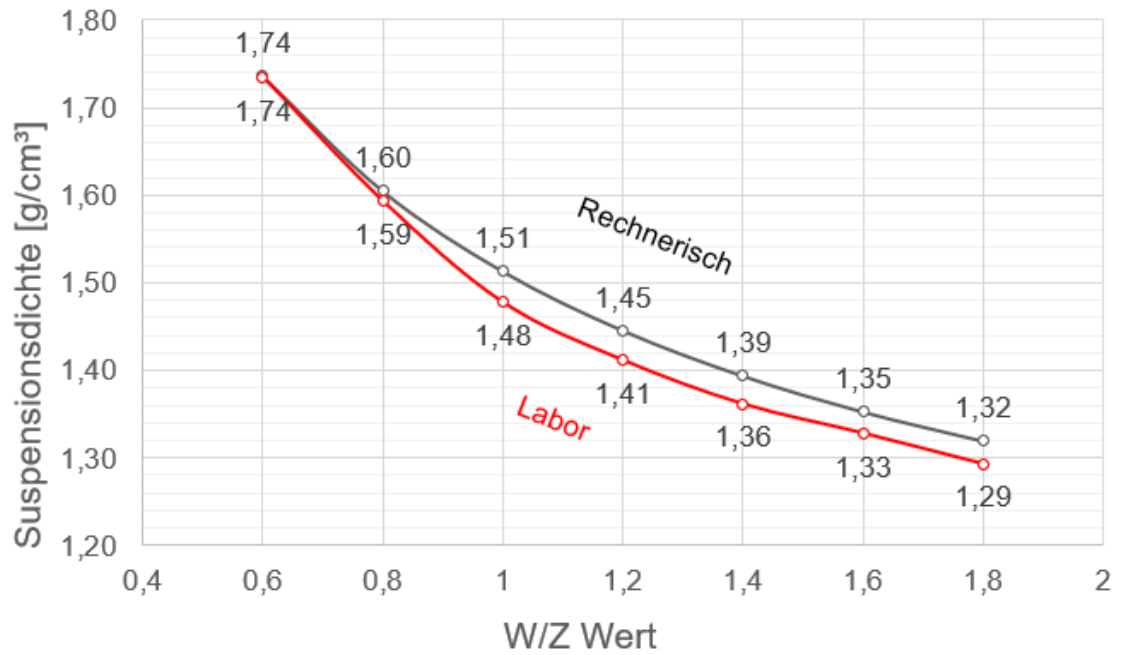


Abb. 26: Rechnerische und in der Praxis ermittelte Dichte der Suspension



Abb. 27: Spülungswaage

## 10.2 Filterpresse

Für Injektionen sind im üblichen stabile Suspensionsmischungen zu bevorzugen. Erkennbar ist die Stabilität einer Suspension durch eine geringe Abgabe von Überschusswasser und eine damit einhergehende geringe Abweichung des vorgesehenen Mischungsverhältnisses, welcher sich aus dem W/Z-Wert ergibt.

Heutzutage werden meist Suspensionen mit einer Filtrationswasserabgabe im Bereich von 80 bis 160 ml nach 7 Minuten verwendet. Es wird dabei versucht, die Filtratwassermenge auf ein Minimum zu reduzieren, um eine hohe Stabilität der Suspension unter hohem Druck zu erreichen. Um eine Wasserabgabe unter 80 ml möglich zu machen, werden spezielle Zusatzmittel eingesetzt, was eine Verbesserung der Injizierbarkeit zur Folge hat.

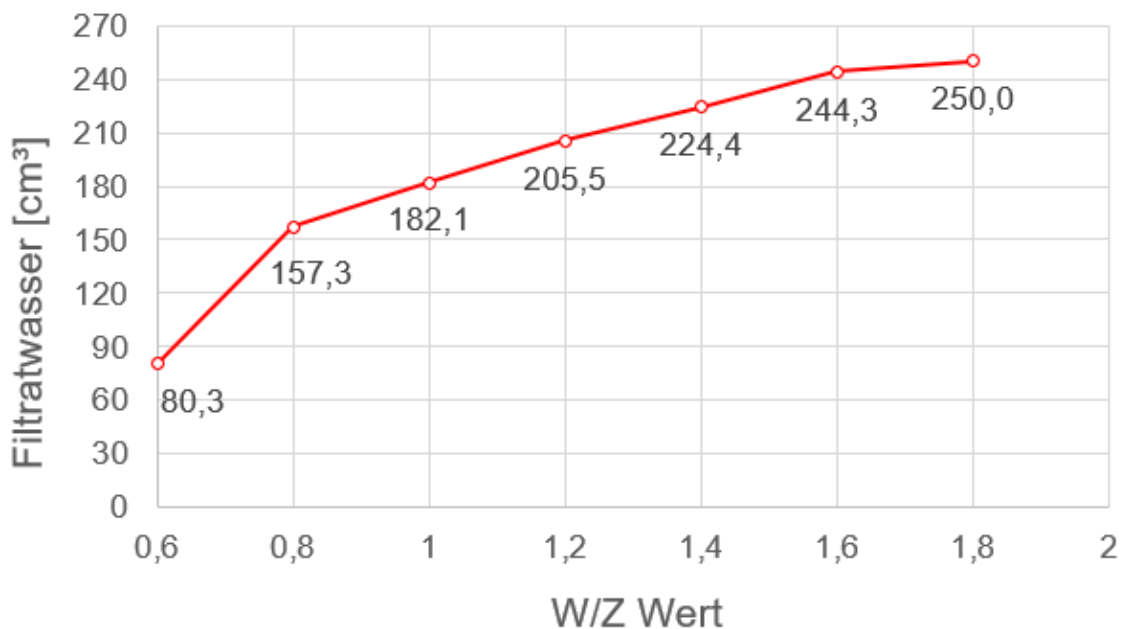


Abb. 28: Filtratwasserabgabe



### 10.3 Bestimmung des Absetzmaßes

Aufgrund der Schwerkraft neigen Suspensionen zu einem Absetzen der Partikel in der Flüssigkeit, besonders bei hohen W/Z-Werten. Das Absetzen von Zementkörnern wird in der Betontechnologie auch als „Bluten“ bezeichnet und ist bei Injektionsarbeiten maßgebend für die Qualität der Ausführung des Ergebnisses. Bei Suspensionen mit einem hohen Wasserabsetzmaß wird bei hohen Drücken oftmals die Injektionseinrichtung verstopft bzw. gibt es auch im Untergrund eine Neigung zur Sedimentation und zur Abgabe von Überschusswasser.

Die Stabilität einer Suspension kann in der Praxis durch Zusätze wie Stabilisatoren, Bentonit, etc., erhöht werden, deren Dosierung von vielen Faktoren abhängt und üblicherweise durch Versuche zur Ermittlung des Wasserabsetzmaßes bestimmt wird. Diese Faktoren sind zum Beispiel die Zementart, der W/Z-Wert und der Chemismus des Anmachwassers.

$$A = \frac{V_0 - V_s}{V_s} \cdot 100 \quad (19)$$

A     [%]    Absetzmaß  
 V<sub>0</sub>   [cm<sup>3</sup>] Ausgangsvolumen der Suspension  
 V<sub>s</sub>   [cm<sup>3</sup>] Volumen der abgesetzten Suspension

In der folgenden Tabelle 7 sind die Ergebnisse dieser Auswertung dargestellt. Zudem stellen alle roten Zahlen jene instabilen Suspensionen dar.

Tab. 7: Ergebnisse des Absetzmaßes

| W/Z Wert        | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6  | 1,8  |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Absetzmaß A [%] | 1,3 | 1,6 | 3,8 | 4,3 | 7,8 | 12,4 | 17,0 |

## 10.4 Beschreibung des Marsh-Trichters

Zur genauen Bestimmung der Viskosität von zementgebundenen Injektionsmaterialien sollte immer eine Viskosimeterversuch durchgeführt werden. Um jedoch auch Insitu eine schnelle Qualitätsüberprüfung des Mischungsverhältnisses der Suspension zu ermöglichen, wird heutzutage meist auf den Marshtrichterversuch zurückgegriffen. Wird bei der Versuchsdurchführung auf eine hohe Genauigkeit geachtet, kann die gemessene Auslaufzeit mit den technischen Merkblättern des Herstellers verglichen werden und eine Abweichung der geforderten Werten kann schnell erkannt werden. Aufgrund der kostengünstigen Versuchsdurchführung und der Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen auf der Baustelle wird der Marshtrichterversuch gerne als schnelle Überprüfung angewendet.



Abb. 29: Marsh – Trichter

## 10.5 Beschreibung der Kugelharfe

Zur Überprüfung der Fließgrenze von Stützsuspensionen (Bentonit-Suspensionen) wird häufig die Kugelharfe verwendet. Anhand der Kugelharfe können nur Fließgrenzen mit mehr als 5 N/m<sup>2</sup> bestimmt werden. Der Einsatzbereich dieses Versuchs beschränkt sich meist auf Stützsuspensionen bei Schlitzwandbaustellen, da die erhältlichen Kugelsätze nicht auf die dünnflüssigen Suspensionen der Injektionstechnik abgestimmt sind.

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse nach drei Minuten anhand der sich ergebenden Fließkurve. Für die Versuchsdurchführung wurde eine Standard-Kugelharfe für Stützsuspensionen verwendet und in einem Gefäß mit bestimmter Füllhöhe der Suspension durchgeführt. Um eine die Ergebnisse nicht zu verfälschen, wurde sowohl der Kugelsatz, als auch das Gefäß, nach jedem Einsatz gereinigt. Dem Anhang A kann die Tabelle zur Bestimmung der Fließgrenze in Abhängigkeit der Suspensionsdichte entnommen werden.

Tab. 8: Bestimmung der Fließgrenze mit der Kugelharfe

| W/Z - Wert | Suspensionsdichte<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Fließgrenze<br>[Kgl.: N/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---|--|
| 0,6        | 1,74                                      | S12:109,25                               |
| 0,8        | 1,59                                      | S9: 80,16                                |
| 1,0        | 1,48                                      | 9: 54,86                                 |
| 1,2        | 1,41                                      | 7: 34,92                                 |
| 1,4        | 1,36                                      | 5: 17,03                                 |
| 1,6        | 1,33                                      | 3: 9,62                                  |
| 1,8        | 1,29                                      | 2: 6,43                                  |

Abbildung 30 zeigt die Relation der Suspensionsdichte zur Fließgrenze bzw. zum W/Z-Wert. Erkennbar ist, dass ein steigender W/Z-Wert sowohl eine Verringerung der Suspensionsdichte als auch eine Reduzierung der Fließgrenze zur Folge hat. Umgekehrt erreicht man durch einen geringen W/Z-Wert eine hohe Suspensionsdichte und somit eine höhere Fließgrenze.

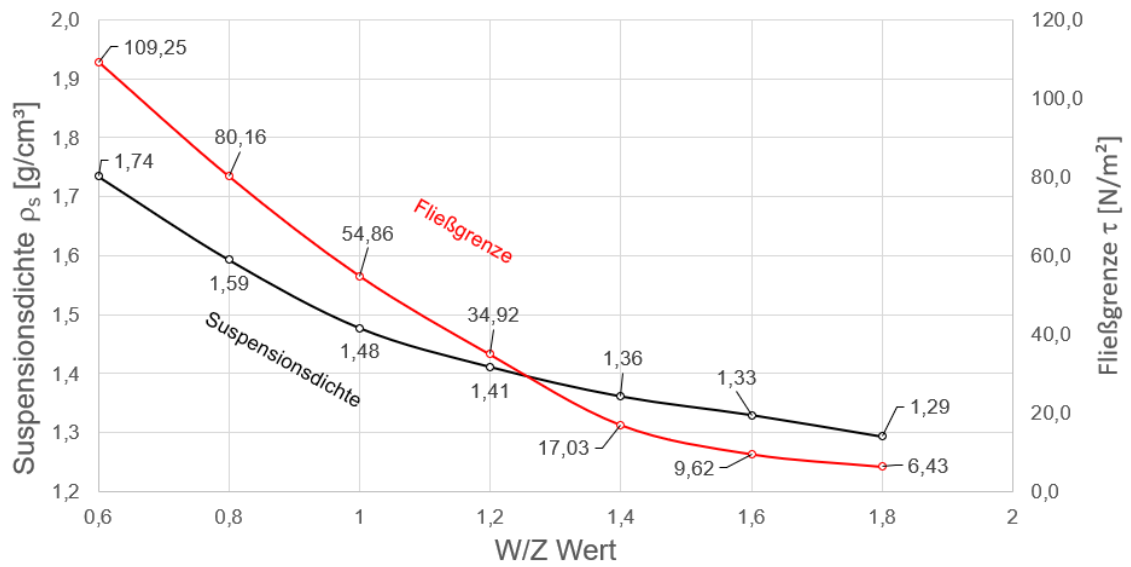


Abb. 30: Fließgrenzen in Abhängigkeit von der Suspensionsdichte und W/Z Wert

## 10.6 Bestimmung des pH-Wertes

Die Diaphragmaelektrode wird in die Suspension getaucht. Nachdem in der Messwertanzeige ein stabiler Messwert einstellt, wird der pH-Wert auf 0,1 Einheiten exakt abgelesen. Die Bestimmung der Temperatur erfolgt entweder automatisch über die Temperaturkompensierung des pH-Meters oder manuell mit Hilfe eines Thermometers. Der Prüfzeitpunkt, der pH-Wert und die Suspensionstemperatur werden im Protokoll vermerkt.



Abb. 31: Digitales pH- und Temperaturmessgerät

## 10.7 Rotationsviskosimeter

Wie unter Kapitel 6 beschrieben, werden zur Analyse und Messung der Fließgrenze mehrere Versuche mittels Rotationsviskosimeter durchgeführt. Wie schon bei den vorhergegangenen Versuchen werden wieder sieben verschiedene Proben vorbereitet, welche sich durch einen W/Z-Wert von 0,6 bis 1,8 unterscheiden. Zusätzlich werden die Versuche 1 Minute nach der Probenherstellung und weiters nach 30 sowie 60 min durchgeführt.

Um die ausgegebenen Daten vergleichbar und analysierbar zu machen, werden die Versuchsergebnisse mittels Gesetz nach Bingham vereinfacht und in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

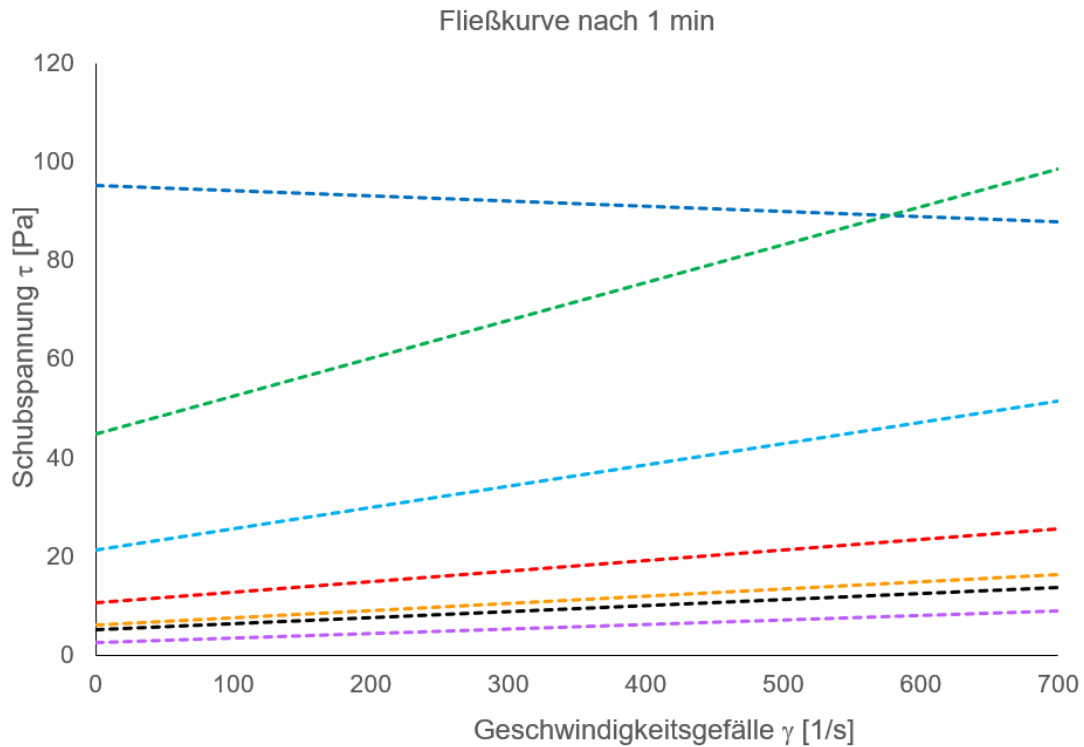
$$\tau = \tau_0 + \eta_p \times D \quad (20)$$

|          |                    |                         |
|----------|--------------------|-------------------------|
| $\tau$   | [Pa]               | Schubspannung           |
| $\tau_0$ | [Pa]               | Fließgrenze             |
| $\eta_p$ | [Pa s]             | plastische Viskosität   |
| D        | [s <sup>-1</sup> ] | Geschwindigkeitsgefälle |

Abb. 32 zeigt die Fließkurven der sieben Proben mit einem W/Z-Wert von 0,6 bis 1,8 und mit einer Versuchsdurchführung nach einer Minute Wartezeit nach der Probenherstellung.

Das Diagramm zeigt, dass bei einem W/Z-Wert von 0,6 der erreichte Wert der Schubspannung sowie die Steigung der Gerade auf eine zu hohe Viskosität für den angewendeten Rotationsviskosimeter hinweist. Das Ergebnis kann somit nicht in Relation mit den anderen Proben gestellt werden.

Weiteres kann aus den dargestellten Ergebnissen abgeleitet werden, dass bei Zunahme des W/Z-Wertes, die zu überwindende Scherspannung  $\tau_0$  sowie die Steigung der Gerade bei zunehmendem Geschwindigkeitsgefälle stark abnehmend ist. Jedoch ist ersichtlich, dass sich die Ergebnisse bei einem W/Z-Wert zwischen 1,4 und 1,8 aufgrund der niedrigen Viskosität nur mehr minimal unterscheiden.



$$\tau_0 = 95,23 \text{ [Pa]} \quad W/Z = 0,6$$

$$\tau_0 = 45,03 \text{ [Pa]} \quad W/Z = 0,8$$

$$\tau_0 = 21,46 \text{ [Pa]} \quad W/Z = 1,0$$

$$\tau_0 = 10,67 \text{ [Pa]} \quad W/Z = 1,2$$

$$\tau_0 = 6,12 \text{ [Pa]} \quad W/Z = 1,4$$

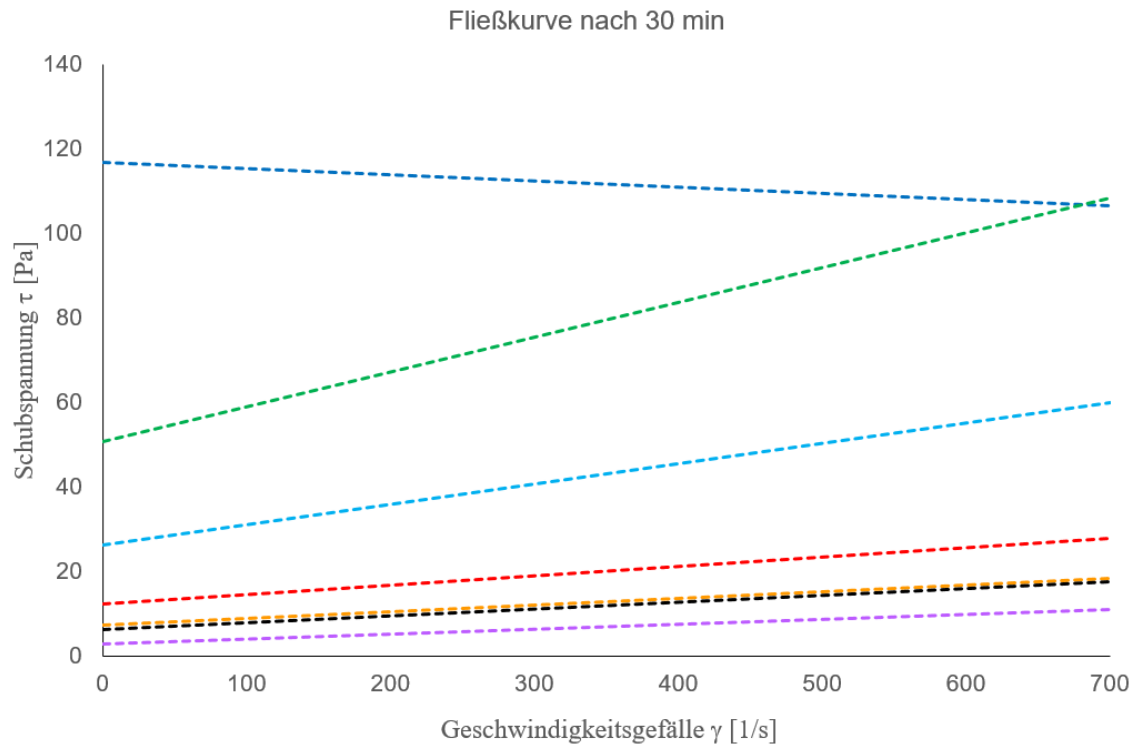
$$\tau_0 = 5,17 \text{ [Pa]} \quad W/Z = 1,6$$

$$\tau_0 = 2,53 \text{ [Pa]} \quad W/Z = 1,8$$

Abb. 32: Fließkurven der Zementbasierte Suspensionen in Abhängigkeit des W/Z-Wertes (nach 1 min.)

Abb. 33 zeigt die Fließkurven nach 30 Minuten Wartezeit nach der Probenherstellung. Wiederum zeigt sich, dass die Ergebnisse mit einem W/Z-Wert von 0,6 nicht in Relation mit den restlichen Proben gebracht werden dürfen.

Es ist erkennbar, dass mit Einsetzen des Abbindeprozesses, die zu überwindende Scherspannung  $\tau_0$  ansteigt, jedoch flachen die Geraden durch die abnehmende plastische Viskosität ab. Klar ersichtlich ist diese Zunahme bei den Proben mit W/Z-Wert 0,8 und 1,0. Zusätzlich ist in Abb. 33 dargestellt, dass sich die Ergebnisse ab einem W/Z-Wert zwischen 1,4 und 1,8 aufgrund der niedrigen Viskosität nur mehr minimal unterscheiden.

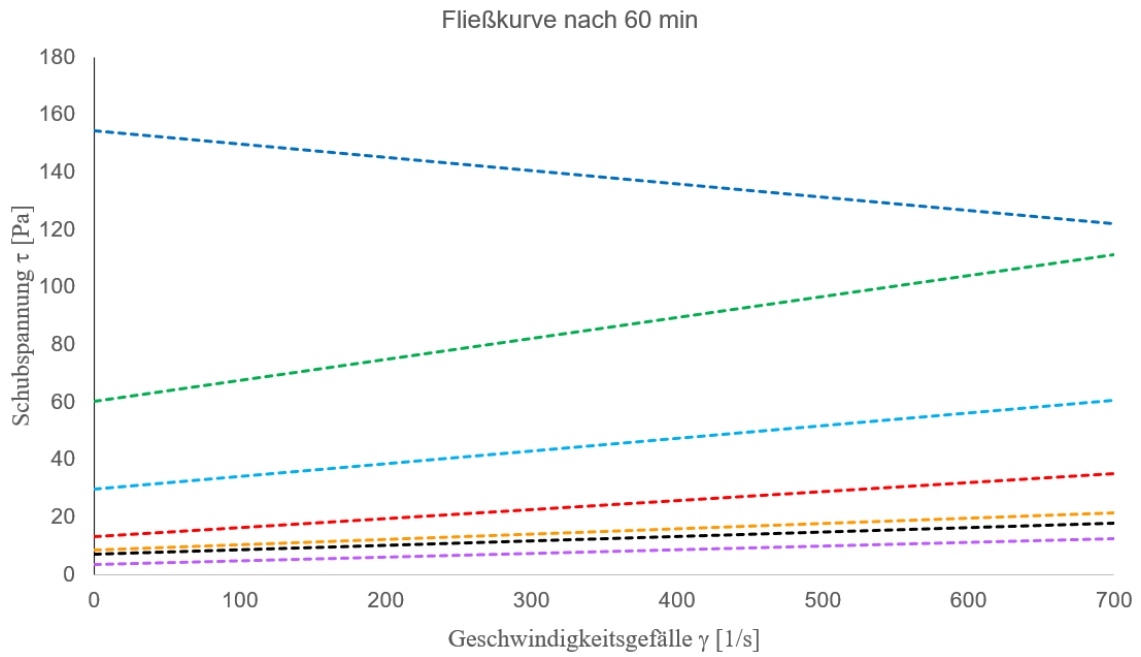


|                                 |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|
| $\tau_0 = 117,0$ [Pa] W/Z = 0,6 | $\tau_0 = 7,27$ [Pa] W/Z = 1,4 |
| $\tau_0 = 50,63$ [Pa] W/Z = 0,8 | $\tau_0 = 6,52$ [Pa] W/Z = 1,6 |
| $\tau_0 = 26,27$ [Pa] W/Z = 1,0 | $\tau_0 = 2,86$ [Pa] W/Z = 1,8 |
| $\tau_0 = 12,16$ [Pa] W/Z = 1,2 |                                |

Abb. 33: Fließkurven der Zementbasierte Suspensionen in Abhängigkeit des W/Z-Wertes (nach 30 min.)

Abb. 34 zeigt die Fließkurven nach einer 60-minütigen Wartezeit nach der Probenherstellung. Analog zu den Diagrammen 1 und 2 kann das Ergebnis mit der ersten Probe und einem W/Z-Wert von 0,6 nicht in Verbindung mit den anderen Ergebnissen gebracht werden. Erneut ist ein Anstieg der Fließgrenze sowie eine Abnahme der plastischen Viskosität ablesbar.





|                                 |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|
| $\tau_0 = 154,4$ [Pa] W/Z = 0,6 | $\tau_0 = 8,4$ [Pa] W/Z = 1,4  |
| $\tau_0 = 60,21$ [Pa] W/Z = 0,8 | $\tau_0 = 7,16$ [Pa] W/Z = 1,6 |
| $\tau_0 = 29,75$ [Pa] W/Z = 1,0 | $\tau_0 = 3,37$ [Pa] W/Z = 1,8 |
| $\tau_0 = 13,14$ [Pa] W/Z = 1,2 |                                |

Abb. 34: Fließkurven der Zementbasierte Suspensionen in Abhängigkeit des W/Z-Wertes (nach 60 min.)

# 11 Durchlässigkeit

## 11.1 Triaxialzelle

Um verwertbare und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden pro Rezeptur jeweils drei gleiche Probenkörper hergestellt und geprüft. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit der Proben mit einem  $W/Z$ -Wert  $< 1,2$  konnten diese nicht in der Triaxialzelle geprüft werden. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Proben mit einem  $W/Z$ -Wert von 1,2 bis 1,8 aufgelistet. Für die Messung der Durchlässigkeit werden alle Proben konstant mit einem Druck von 2 Bar beaufschlagt.



Abb. 35: Triaxialzelle für Durchlässigkeitsuntersuchung

Die geringe Durchlässigkeit zu Beginn der Versuchsdurchführung, ergibt sich aus dem noch nicht vollständig gesättigten Probenkörper. Die Versuche sind beendet, wenn sich über einen längeren Zeitraum eine konstante Durchlässigkeit eingestellt hat.

Die nachfolgenden logarithmischen Diagramme zeigen die Versuchsergebnisse von jeweils drei Proben mit gleichem W/Z-Wert. Die Ergebnisse des Durchlässigkeitsbeiwertes  $k_f$  werden anschließend gemittelt.

In Abb. 36 sind die Versuchsergebnisse für die Proben mit einem W/Z-Wert von 1,2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich nach 120 Stunden ein Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 2,2 \times 10^{-11}$  einstellt.

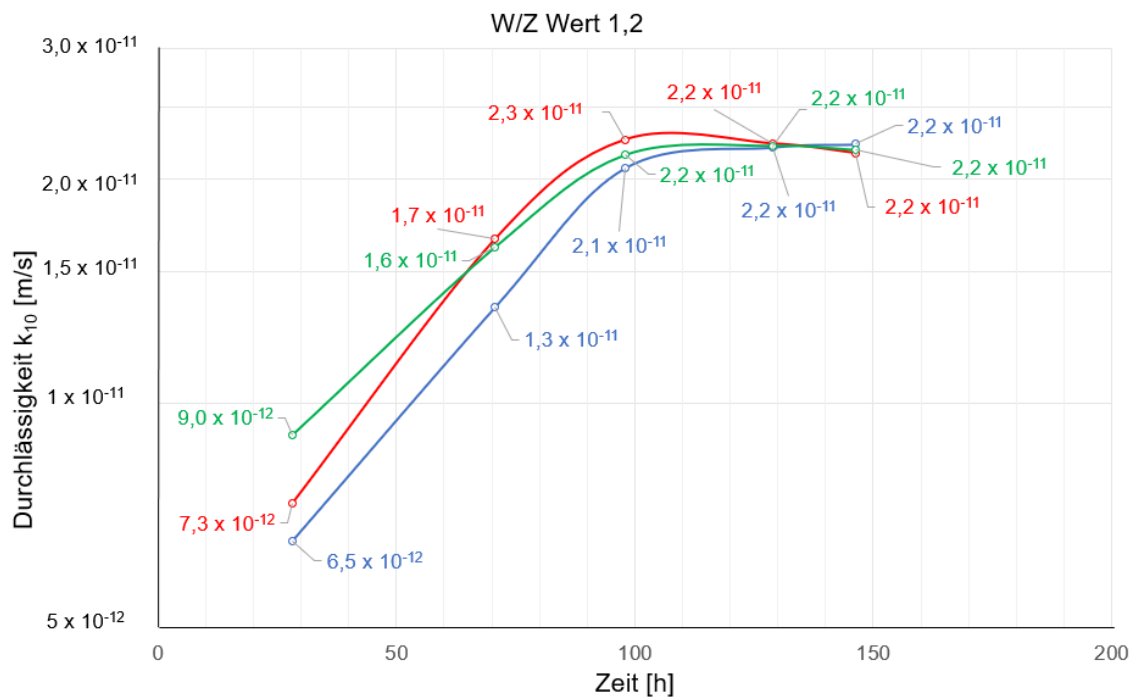


Abb. 36: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 1,2$ )

In Abb. 37 sind die Versuchsergebnisse der Probenkörper mit einem W/Z-Wert von 1,4 dargestellt. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 3,0 \times 10^{-11}$  hat sich nach einem Zeitraum von 100 Stunden eingestellt.

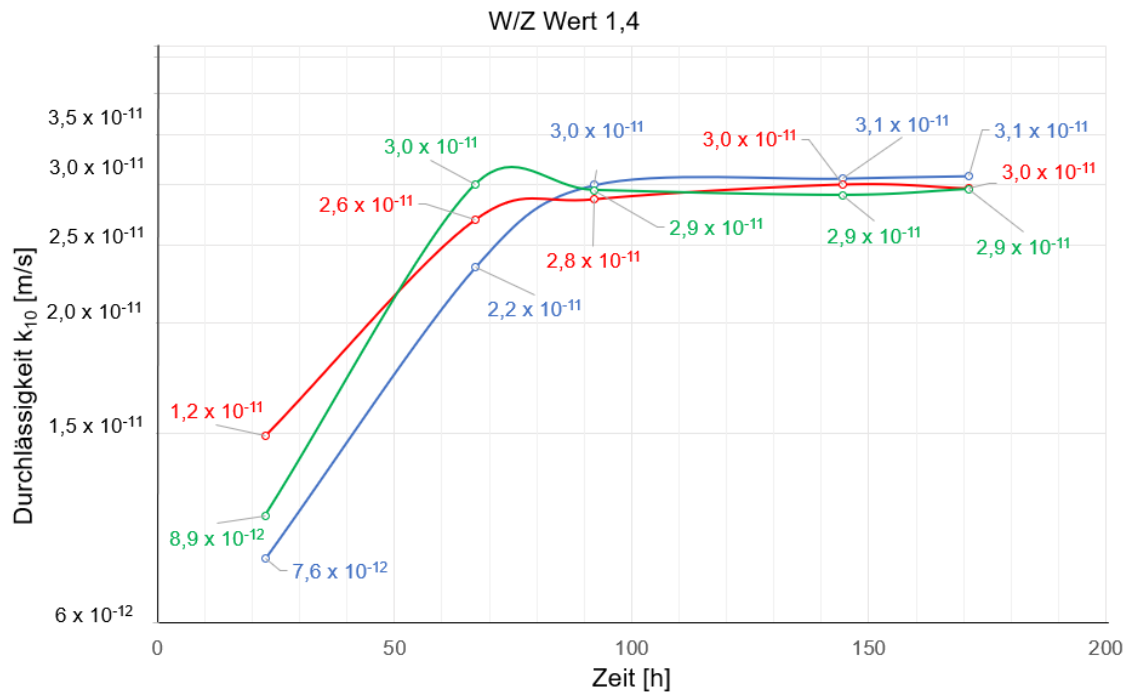


Abb. 37: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 1,4$ )

In Abb. 38 sind die Versuchsergebnisse der Probenkörper mit einem  $W/Z$ -Wert von 1,6 ersichtlich. Ein konstanter Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f = 4,2 \times 10^{-11}$  ergab sich nach 150 Stunden.

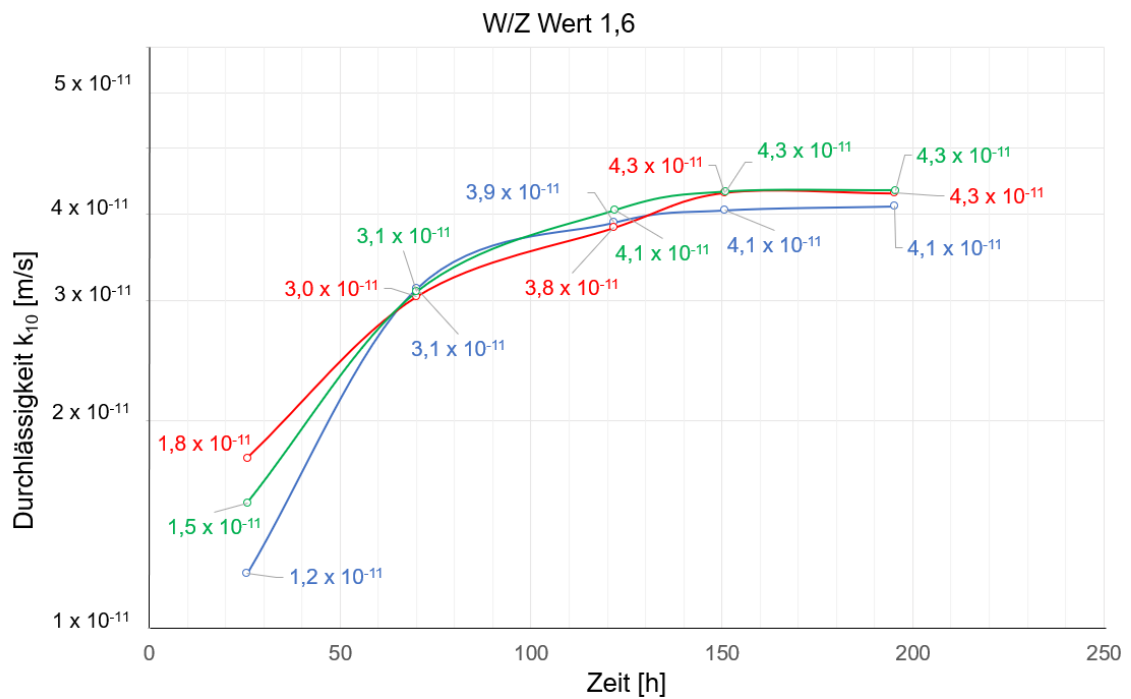


Abb. 38: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 1,6$ )

Abb. 39 zeigt die Ergebnisse der Versuchsdurchführung der Proben mit einem W/Z-Wert von 1,8. Ein konstanter Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f = 2 \times 10^{-10}$  konnte nach 80 Stunden erreicht werden.

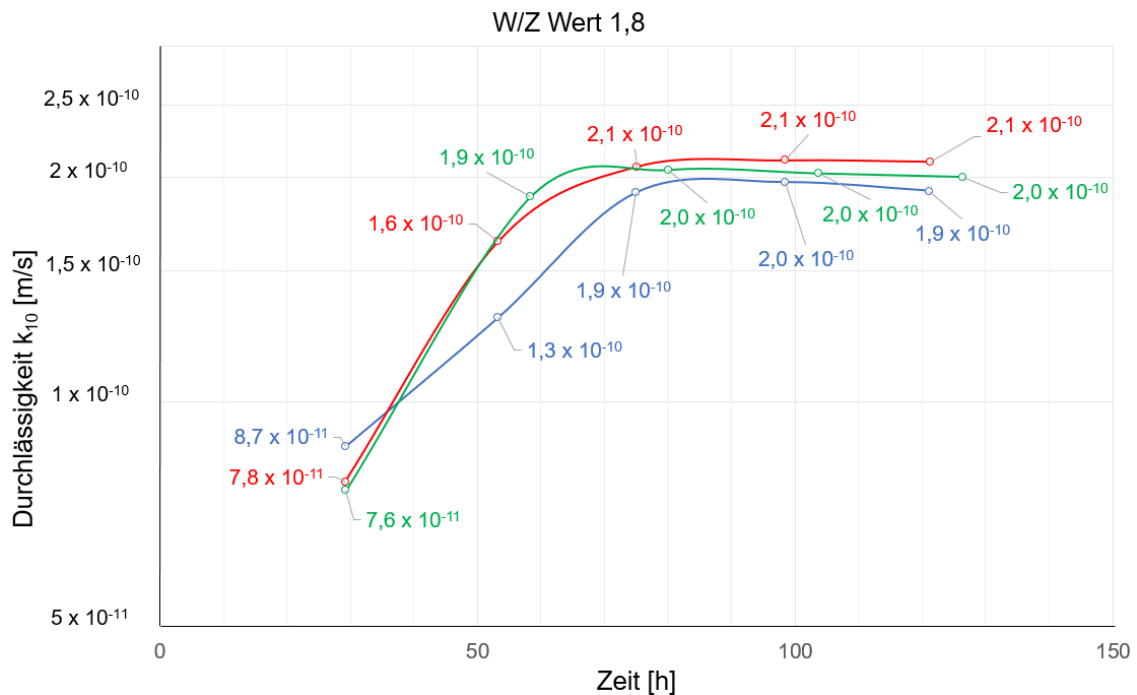


Abb. 39: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 1,8$ )

## 11.2 Triaxialgerät

Wie in Kapitel 11.1 erwähnt, können mit einer Triaxialzelle nur Proben mit einem W/Z-Wert  $> 1,0$  und somit höheren Durchlässigkeiten geprüft werden. Für die Prüfung der Durchlässigkeit der Versuchskörper mit einem W/Z-Wert von 0,6 bis 1,0 wird das Triaxialgerät verwendet.

Die Versuchsdurchführung erfolgt analog zu jenen mit der Triaxialzelle, jedoch werden die jeweiligen Proben mit einem konstanten Wasserdruck von 8 Bar beaufschlagt.

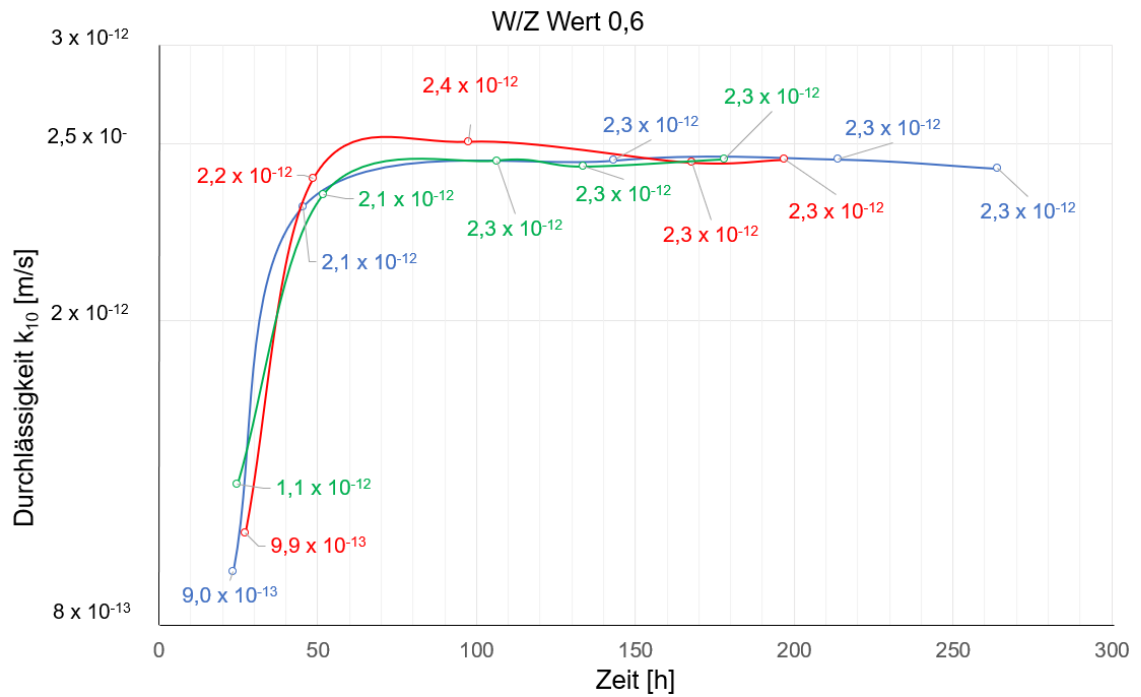
Um verwertbare Ergebnisse zu erreichen, werden die Versuche erneut dreimal mit gleichem W/Z-Wert durchgeführt. Das Ende des Versuches ist erreicht, wenn sich ein konstanter Durchlässigkeitsbeiwert über einen längeren Zeitraum eingestellt hat.



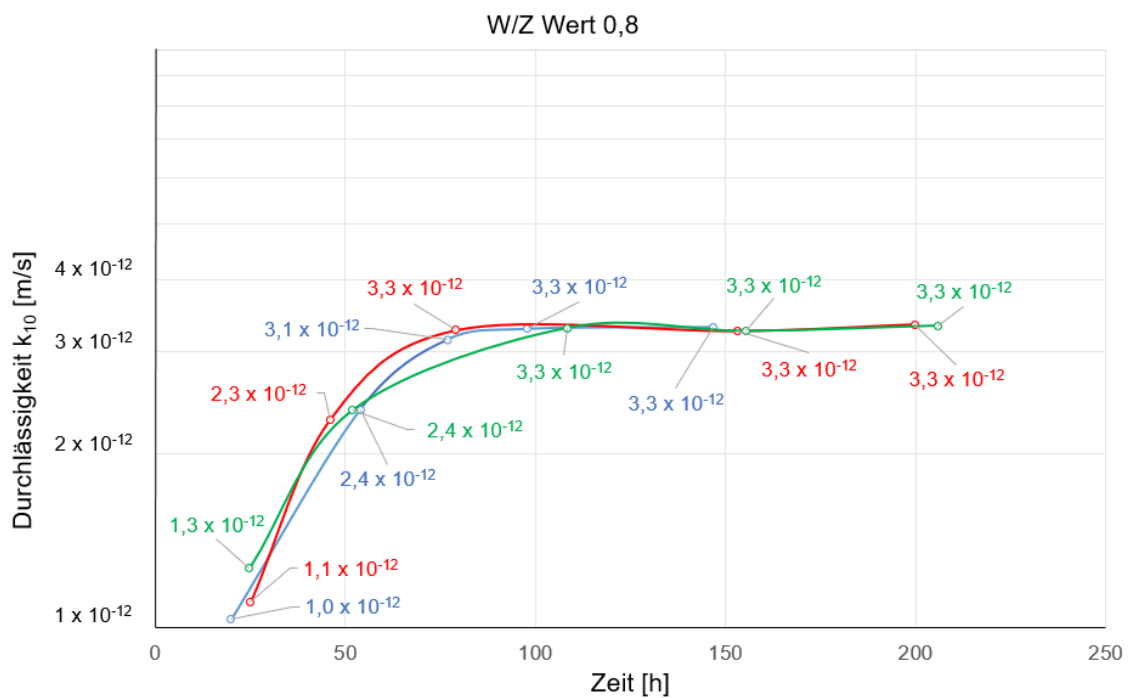
Abb. 40: Triaxialgerät

In den folgenden logarithmischen Diagrammen sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Für den Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  werden wiederum die Ergebnisse von drei Versuchen gemittelt.

In Abb. 41 sind die Ergebnisse für einen W/Z-Wert von 0,6 dargestellt. Ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f = 2,3 \times 10^{-12}$  stellte sich nach einem Zeitraum von 150 Stunden ein.

Abb. 41: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 0,6$ )

In Abb. 42 sind die Versuchsergebnisse für die Proben mit einem  $W/Z$ -Wert von 0,8 ersichtlich. Nach 110 Stunden wurde ein Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 3,3 \times 10^{-12}$  erreicht.

Abb. 42: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 0,8$ )

Die Ergebnisse nach der Versuchsdurchführung mit einem W/Z-Wert von 1,0 sind in Abb. 43 dargestellt. Ein konstanter Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 4,3 \times 10^{-12}$  stellte sich nach einem Zeitraum von 125 Stunden ein.

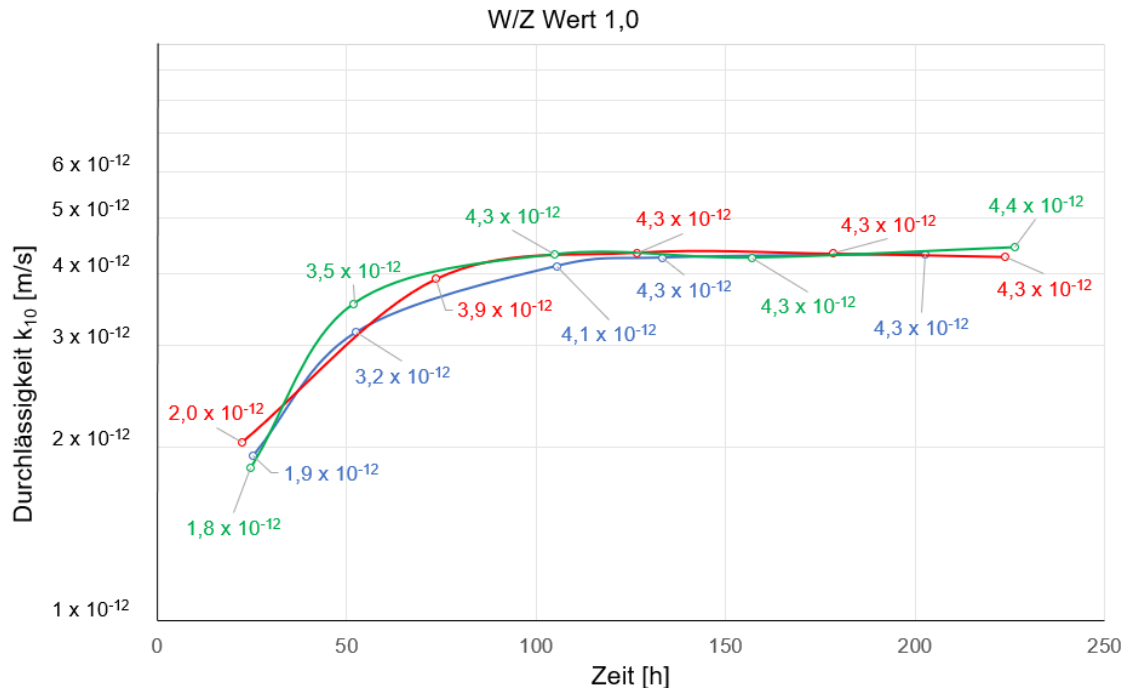


Abb. 43: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 1,0$ )



### 11.3 Kapillarmessung für $k < 10^{-10}$

Um auch geringe Durchlässigkeiten messen zu können, wird mit der Kapillarmessung die Bewegungsgeschwindigkeit einer eingeschlossenen Luftblase im System gemessen, wie in Abb. 44 präsentiert wird. Der Wasserdruck bei der Versuchsdurchführung wird konstant bei 2 bar gehalten. Um die Versuche vergleichbar zu machen und die Schwankungsbreite zu reduzieren, ist bei der Kapillarmessung eine konstante Umgebungstemperatur von 20 °C unabdingbar.



Abb. 44: Vorrichtung zur Messung kleinste Wasservolumen

Gleich zu den Durchlässigkeitsversuchen mit der Triaxialzelle und dem Triaxialgerät, werden auch bei der Kapillarmessung jeweils drei Versuchsläufe mit Probenkörper mit gleichem W/Z-Wert durchgeführt. Die Versuche gelten als beendet, wenn sich ein konstanter Durchlässigkeitsbeiwert über einen längeren Zeitraum einstellt.

Als Vorteil der Kapillarmessung gilt, dass sowohl Proben mit W/Z-Wert von 0,6 als auch Versuchskörper mit einem W/Z-Wert von 1,8 geprüft werden können. Zusätzlich ist in den nachfolgenden Diagrammen ersichtlich, dass die Ergebnisse nahezu ident zu den vorhergegangenen Versuchen mit der Triaxialzelle sowie Triaxialgerät sind.

Im Folgenden sind die logarithmischen Diagramme mit den Versuchsergebnissen abgebildet. Der Mittelwert von drei Versuchsdurchführungen ergibt dabei den Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$ .

In Abb. 45 sind die Ergebnisse der Prüfkörper mit einem W/Z-Wert von 0,6 dargestellt. Ein konstanter Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 3,0 \times 10^{-12}$  konnte nach einem Zeitraum von 170 Stunden erreicht werden.

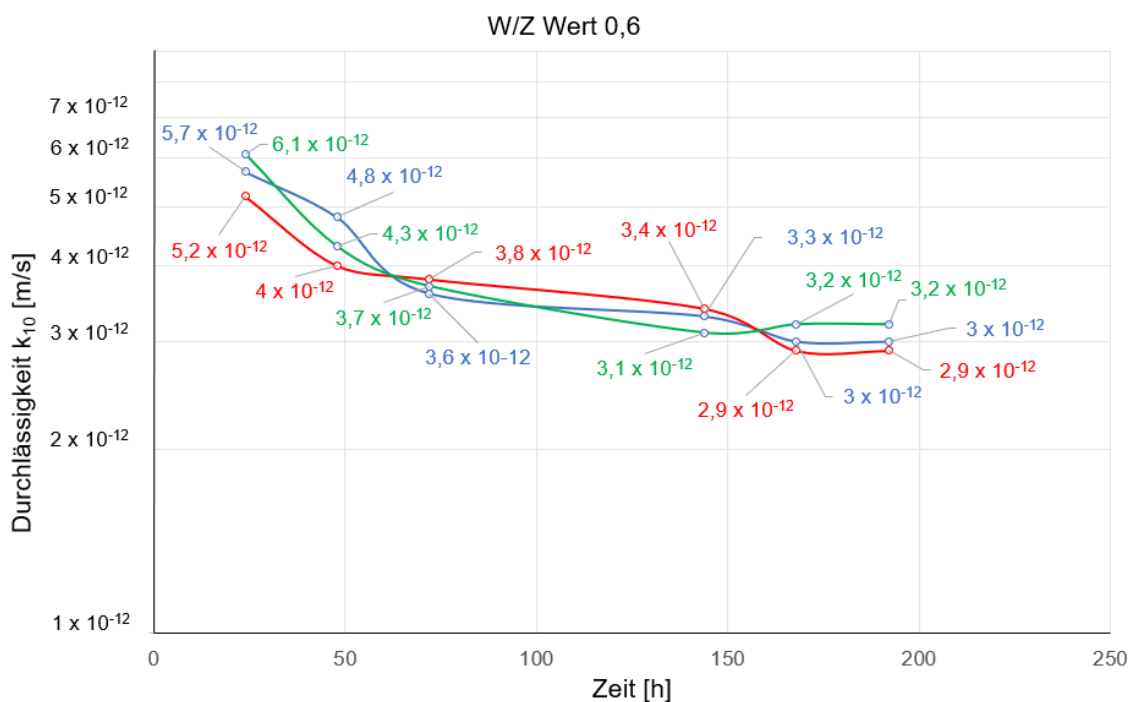


Abb. 45: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 0,6$ )

Abb. 46 zeigt die Durchlässigkeitsbeiwerte der Versuche mit einem W/Z-Wert von 0,8. Nach 170 Stunden wurde ein Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 3,8 \times 10^{-12}$  erreicht.

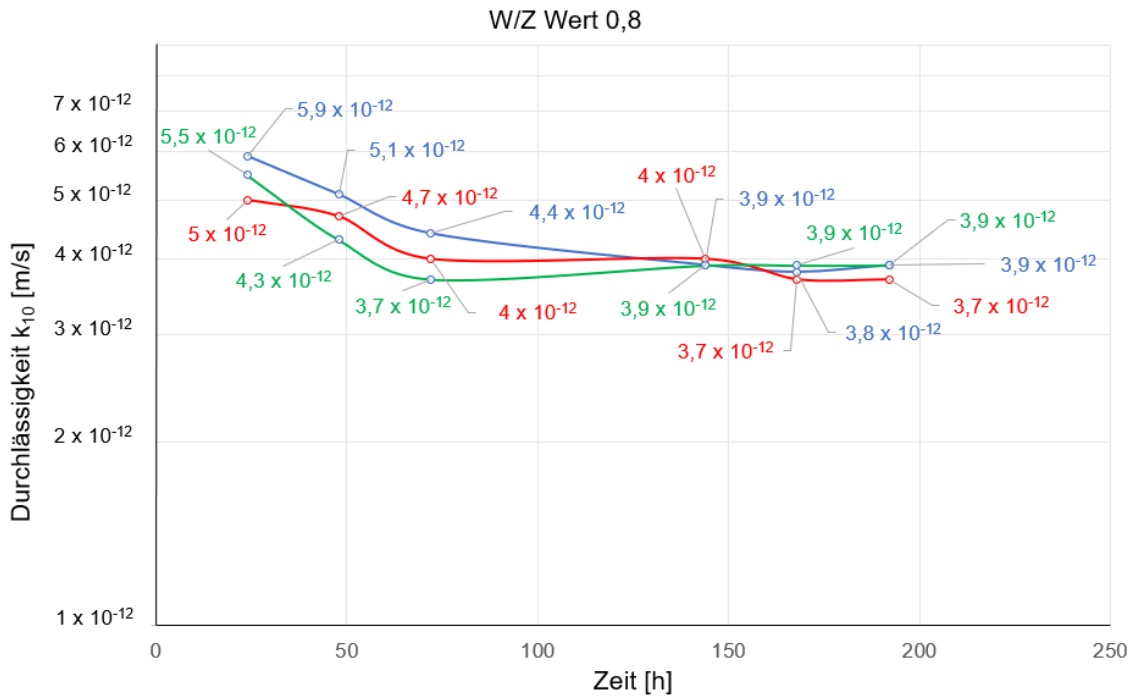


Abb. 46: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 0,8$ )

Mit einem  $W/Z$ -Wert von 1,0 stellte sich nach 170 Stunden ein konstanter Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f = 5,0 \times 10^{-12}$  ein, siehe Abb. 47.

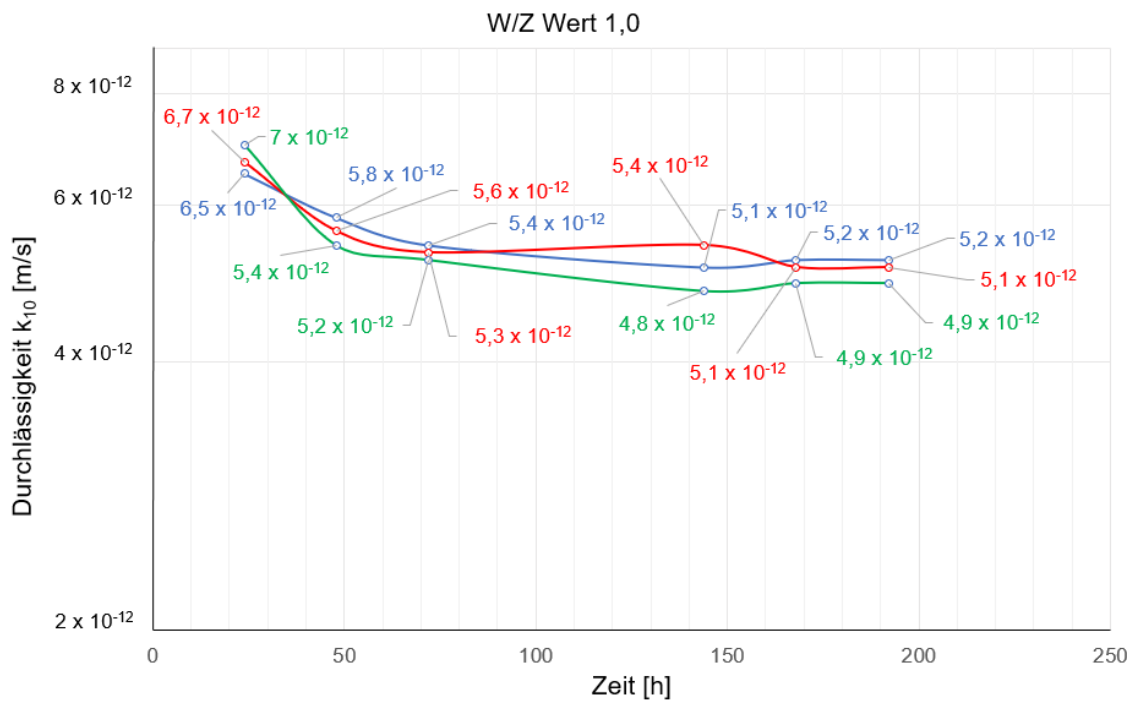


Abb. 47: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 1,0$ )

Wie in Abb. 48 ersichtlich, stellte sich bei den Proben mit einem W/Z-Wert von 1,2 ein konstanter Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 3,3 \times 10^{-11}$  nach 170 Stunden ein.

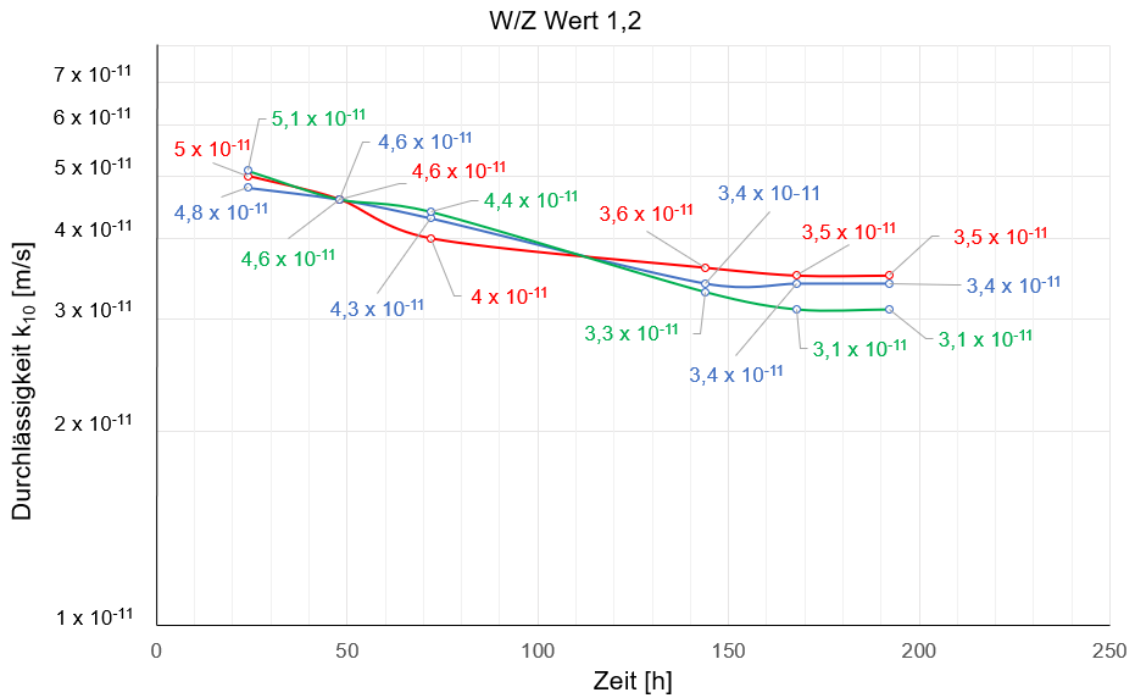


Abb. 48: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 1,2$ )

Die Ergebnisse der Versuchsdurchführung mit einem W/Z-Wert von 1,4 sind in Abb. 49 ersichtlich. Nach 170 Stunden konnte ein Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 4,7 \times 10^{-11}$  erreicht werden.

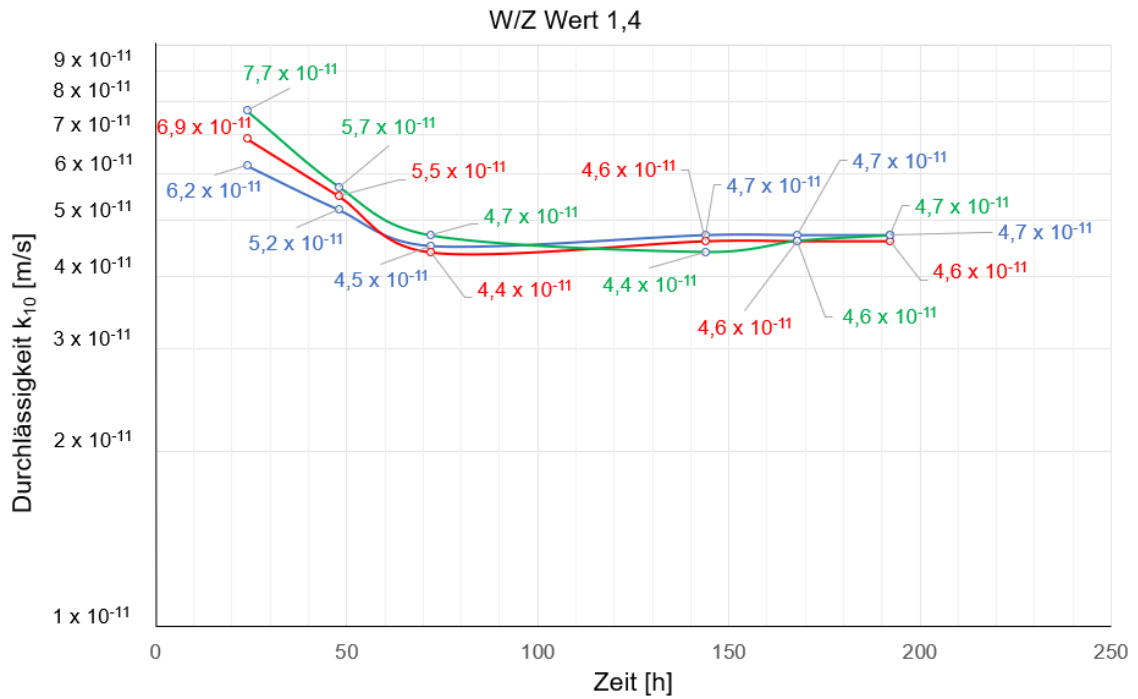


Abb. 49: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 1,4$ )

Mit einem  $W/Z$ -Wert von 1,6 konnte nach 145 Stunden ein Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 6,2 \times 10^{-11}$  gemessen werden, siehe Abb. 50.

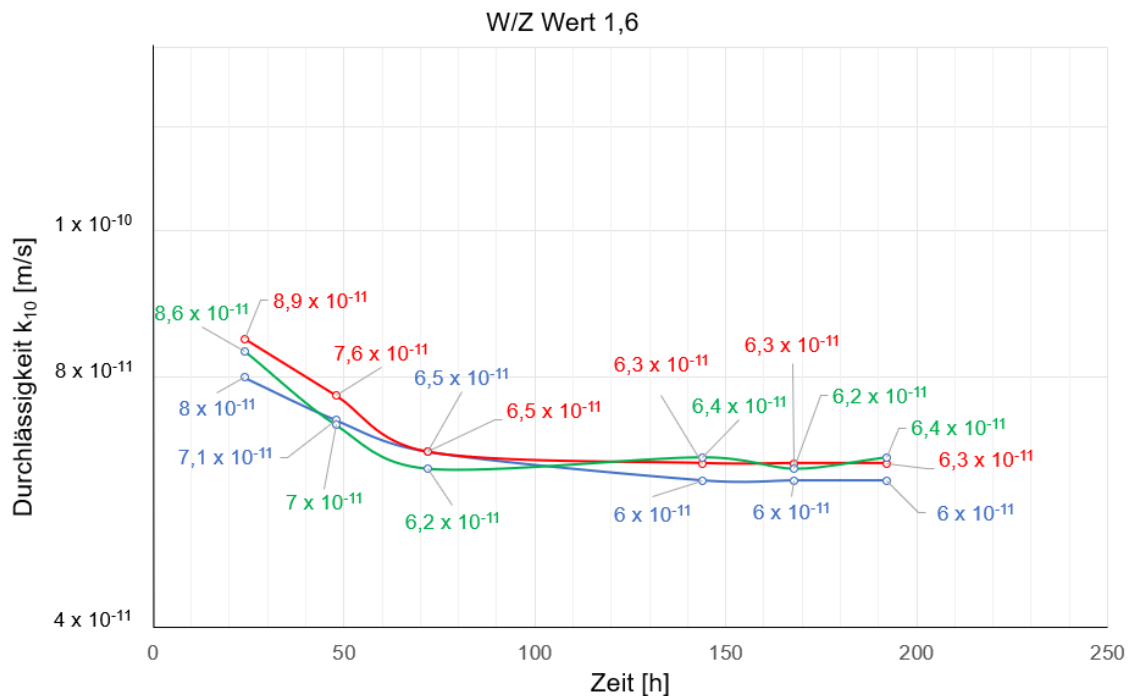


Abb. 50: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 1,6$ )

In Abb. 51 sind die Ergebnisse der Proben mit einem W/Z-Wert von 1,8 dargestellt. Es stellte sich ein Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 5,4 \times 10^{-10}$  nach 145 Stunden ein.

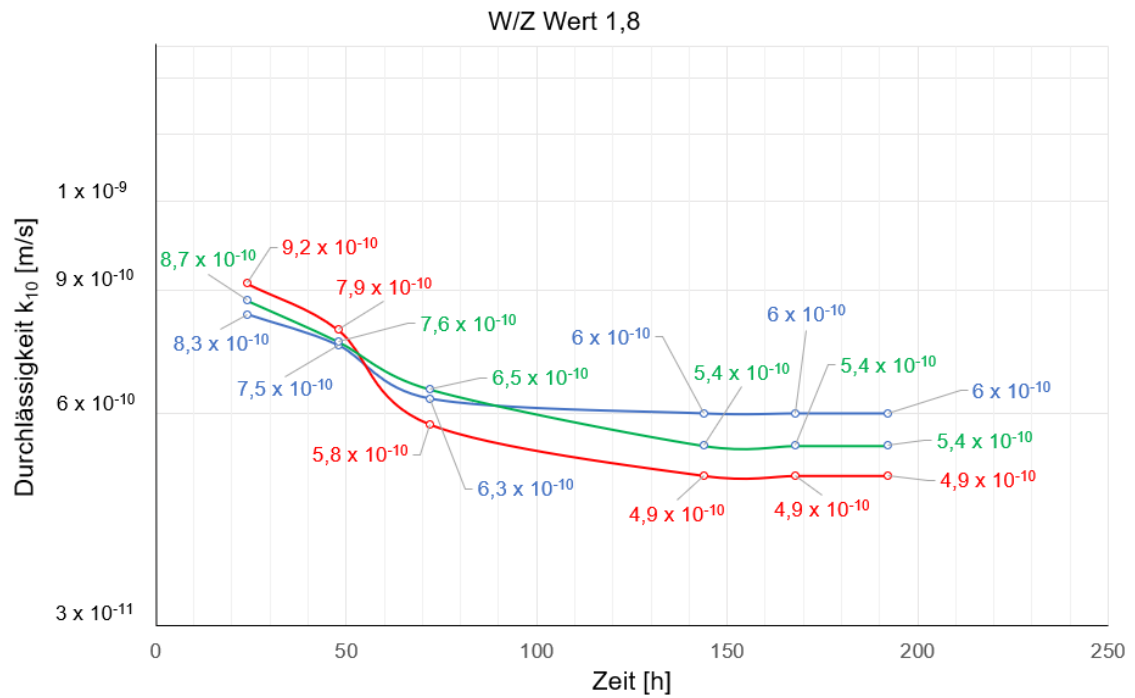


Abb. 51: Qualitative Darstellung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $W/Z = 1,8$ )

## 12 Schlussfolgerungen

Aus den vorgestellten Arbeiten werden zwei Aspekte als Fazit gezogen. Jene mit dem Bezug auf die Versuchstechnik zählen zur ersten Gruppe. Zur zweiten Gruppe gehören die Untersuchungen der Wasserdurchlässigkeit von zementbasierten Suspensionen. In dieser hier publizierten Arbeit wurden sieben Suspensionen mit einem W/Z Wert zwischen 0,6 und 1,8 untersucht.

Zur Ermittlung der Mischung mit Zement ist das Wasserabsetzmaß von wesentlicher Bedeutung, da es die Fließeigenschaften, die Druckfestigkeit und dessen zeitliche Entwicklung bestimmt. Bei den Wasserabsetzmaßen muss auf die W/B Werte Acht gegeben werden, da hohe W/B-Werte die Fließeigenschaften der Stoffe fördern, jedoch negative Auswirkungen auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit/Beständigkeit der Injektionsmasse haben. Nach der europäischen Norm EN 12715:2000 muss das Absetzmaß mit einem 1000 ml Messzylinder (Innendurchmesser 60 mm) kontrolliert werden. Der Durchmesser des Prüfgefäßes ist wesentlich für das Ergebnis des Absetzmaßes.

Die Verarbeitung, den Leitungstransport und das Ausbreitverhalten der Suspension im Untergrund ist bestimmt von der Kenntnis über der Viskosität und der Fließgrenze der zu injizierenden Suspension. Für die Untersuchung der Fließeigenschaften wurde ein Marshtrichter, ein Rotationsviskosimeter und eine Kugelharfe verwendet. Mit Hilfe eines Viskosimeters kann die Fließeigenschaft (Viskosität und Fließgrenze) von zementbasierten Injektionsmaterialien hinsichtlich ihres rheologischen Verhaltens besonders gut charakterisiert werden. Vorteilhaft bei dieser Methode ist, dass hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Pumpfähigkeit und Fließfähigkeit beim Injektionsvorgang eine klare Gliederung der Materialien ersichtlich ist. Auszuschließen sind Prüfungen mit der Kugelharfe und dem Marshtrichter, da sie für Untersuchungen im Labor zur Eignungsprüfung von zementgebundenen Injektionsmaterialien untauglich sind, da sie eine unzureichende Aussagekraft haben. Beide Untersuchungen dienen nur zur Qualitätsprüfung des Mischungsverhältnisses und können auf der Baustelle vorgenommen werden, da sie unempfindlich gegen äußere Einflüsse und einfach zu bedienen sind.

Meistens finden zementbasierte Suspensionen als Injektionsmittel Verwendung. Es gibt zahlreiche variierende Bindemittel und Zusätze, die dem Anwender zur Auswahl stehen. Grundsätzlich sind projektspezifische Vorgaben und Randbedingungen maßgeblich für die Auswahl und Zusammenstellung der idealen Mischung. Zur Vereinheitlichung und Vergleichbarkeit im europäischen Raum

sollten Prüfmethode für Injektionsmaterialien genorm werden, um eine repräsentative Prüfung zu gewährleisten.

Aus der Verringerung des W/Z-Wertes resultiert eine höhere Suspensionsdichte, somit auch eine erhöhte Viskosität und zugleich wird die Stabilität der Suspension im flüssigen Zustand verbessert. Die Suspensionsdichte berechnet sich aus der Masse des Feststoffes bezogen auf das Volumen. Beim Erhöhen des Feststoffanteils erhält man grundsätzlich eine höhere Druckfestigkeit und eine geringere Durchlässigkeit des Zementsteins, zusätzlich steigt die Dauerhaftigkeit und die Erosionsstabilität.



# 13 Literaturverzeichnis

Baerns M. (2013)

Technische Chemie, 2. erw. Aufl., Wiley – VCH Verlag; Weinheim

Daller, J. Nipitsch, G., Wagner, O. K. (2013)

Geomechanics and Tunnelling 6 (2013), No.6.; Special features of tendering contract SBT2.1 – Fröschnitzgraben Tunnel, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH Co. KG, Berlin.

Dr. Volkmann (1999)

Prüfvorschriften des Sachgebietes Spezialtiefbau/Umwelttechnik:  
Prüfvorschrift T-805, Bestimmung der Suspensionsdichte, Wilhelm Dyckerhoff Institut, Wiesbaden

Gmehling, J.; Brehm, A. (1996)

Grundoperationen, Lehrbuch der Technische Chemie Band 2, Georg Thieme Verlag; Stuttgart

Hampel, T. (2001)

Experimentelle Analyse des Tragverhaltens von Hochleistungsbeton unter mehraxialer Beanspruchung, Dissertation, Dresden

Kainrath, A. (2017)

Injektionen im Lockergestein, Prüfverfahren für zementbasiertes Injektionsgut und injizierte Böden, Dissertation, Wien

Kulicke W.-M. (1986)

Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen, Hüthig und Wepf Verlag; Basel

Meseck, H. (1987)

Mechanische Eigenschaften von mineralischen Dichtwandmassen, Dissertation, Braunschweig

Neroth, G., Dieter Vollschaar, Wendehorst Reinhard (2011)

Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz, 27.Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner

Schulz, T. (2001)

Einfluss von in situ – Randbedingungen auf die Feststoffeigenschaften von Dichtwandmassen, Dissertation, Braunschweig

- DIN 53135 (1968)  
Filtrierpapier für chemische Analysen. Einteilung, Bezeichnung, Haupteigenschaften, Prüfverfahren, Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN 4127 (2014)  
Erd- und Grundbau, Prüfverfahren für Stützflüssigkeiten im Schlitzwanbau und für deren Ausgangsstoffe, Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN 1342-2 (1986)  
Viskosität; Teil 2: Newtonsche Flüssigkeiten, Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN 52018-1 (1976)  
Messung der dynamischen Viskosität newtonscher Flüssigkeiten mit Rotationsviskosimeter: Teil 1: Grundlagen, Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN 18130-1 (1998)  
Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts; Teil 1: Deutsches Institut für Normung, Berlin
- ÖNORM EN 197-1 (2011)  
Zement; Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, Austrian Standards Institute, Wien
- ÖNORM EN 12715 (2001)  
Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau), Injektionen, Austrian Standards Institute, Wien
- ÖNORM EN ISO 10414-1 (2009)  
Erdöl- und Erdgasindustrie – Feldprüfung von Bohrflüssigkeiten, Teil 1: Flüssigkeiten auf Wasserbasis, Austrian Standards Institute, Wien
- ÖNORM EN ISO 17892-7 (2018)  
Geotechnische Erkundungen und Untersuchungen – Laborversuche an Bodenproben; Teil 7: Einaxialer Druckversuch, Austrian Standards Institute, Wien
- ÖNORM 4414-1 (1976)  
Erd- und Grundbau, Untersuchungen von Bodenproben, Bestimmung der Dichte des Bodens; Teil 1: Labormethoden, Austrian Standards Institute, Wien

**ÖNORM EN 4410 (2009)**

Geotechnik - Untersuchungen von Bodenproben; Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung unter Einbeziehung der VORNORMN ÖNORM CEN ISO/TS 17892-1, Austrian Standards Institute, Wien

**ÖNORM 4422-1 (1992)**

Erd-und Grundbau, Untersuchungen von Bodenproben, Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit; Teil 1: Laborprüfungen, Austrian Standards Institute, Wien

Webseite: Baltisch - Adriatischer Korridor

<https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrecken/suedstrecke-wien-villach/semmering-basistunnel/mehr-wissen/imagebro-schuere-semmering-basistunnel.pdf>, 06.08.2019

Webseite: Bauabschnitte

[https://gsv.co.at/wp-content/uploads/2017%2009%2014%20Nipitsch\\_resource\\_neffizienter%20TB.pdf](https://gsv.co.at/wp-content/uploads/2017%2009%2014%20Nipitsch_resource_neffizienter%20TB.pdf), 06.08.2019

Webseite: Definition Bentonit

<https://bentonit.de/bentonit/definition-bentonit/index.php>, 06.08.2019

Webseite: Filterpresse nach DIN 4127:2014

[http://www.ofite.com/doc/140-30\\_instructions.pdf](http://www.ofite.com/doc/140-30_instructions.pdf), 06.08.2019

Webseite: Mindestgehalt Montmorillonit

<https://bentonit.de/bentonit/mindestgehalt-montmorillonit/index.php>, 06.08.2019

Webseite: Montmorillonit

<https://bentonit.de/bentonit/erweitert/index.php>, 06.08.2019

Webseite: Neue Österreichische Tunnelbaumethode

<https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrecken/suedstrecke-wien-villach/semmering-basistunnel/mehr-wissen/imagebro-schuere-semmering-basistunnel.pdf>, 06.08.2019

Webseite: Spülungswaage entsprechend ÖNORM EN ISO 10414 – 1:2009

<http://blog.tran.su/shkola/goods/drilling-mud-weight>, 06.08.2019

Webseite: Vortrieb mit Hilfe einer Tunnelvortriebsmaschine

<https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrecken/suedstrecke-wien-villach/semmering-basistunnel/mehr-wissen/imagebro-schuere-semmering-basistunnel.pdf>, 06.08.2019

Webseite: (Holze R. et.al. 2010)

Holze R, Nichtnewtonsche Flüssigkeiten, RD-14-01075 (2010) in Böckler F., Dill B., Dingerdissen U., Eisenbrand G., Faupel F., Fugmann B., Gamse T., Matissek R., Pohnert G., Sprenger G., RÖMPP [Online], Stuttgart, Georg Thieme Verlag

<https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-14-01075>, 11.08.2020

Webseite: (Millow S. et.al. 2005)

Millow S, Fließkurve, RD-06-01165 (2005) in Böckler F., Dill B., Dingerdissen U., Eisenbrand G., Faupel F., Fugmann B., Gamse T., Matissek R., Pohnert G., Sprenger G., RÖMPP [Online], Stuttgart, Georg Thieme Verlag  
<https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-06-01165>, 11.08.2020



Webseite: (Millow S. et.al. 2005)

Millow S, Fließverhalten, RD-06-01171 (2005) in Böckler F., Dill B., Dingerdissen U., Eisenbrand G., Faupel F., Fugmann B., Gamse T., Matissek R., Pohnert G., Sprenger G., RÖMPP [Online], Stuttgart, Georg Thieme Verlag  
<https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-06-01171>, 11.08.2020

Webseite: (Millow S. et.al. 2005)

Millow S, Viskositätskurve, RD-22-01266 (2005) in Böckler F., Dill B., Dingerdissen U., Eisenbrand G., Faupel F., Fugmann B., Gamse T., Matissek R., Pohnert G., Sprenger G., RÖMPP [Online], Stuttgart, Georg Thieme Verlag  
<https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-22-01266>, 11.08.2020

# 14 Anhang


|  <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND<br/>NUMERISCHE GEOTECHNIK</b>  |               |
|---|---------------|
| <b>DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE</b>   |               |
| <b>PROBE</b>  | <b>EINBAU</b> |
| W/Z Wert  | 0,6           |
| Durchmesser D [cm]  | 10,4          |
| Durchströmte Länge l [cm]   | 12,1          |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]   | 84,95         |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ]  | 1027,88       |
| Datum (Beginn)  | 07.03.2018    |
| Versuchsbeginn  | 13:10         |
| Temperatur (Beginn)   | 23,2          |
| Datum (Ende)  | 08.03.2018    |
| Versuchsende  | 12:35         |
| Temperatur (Ende)   | 23,6          |
| Versuchsdauer   | 84300         |
| Messglass (Beginn)  | 93,1          |
| Messglass (Ende)  | 93,7          |
| Wassermenge   | 0,6           |
| Höhendifferenz  | 8000          |
| Hydraul. Gefälle  | 661,16        |
| Temperatur Mittelwert   | 23,4          |
| F <sub>k</sub> Temp (α)   | 0,7119        |
| Durchlässigkeit   | 1,27E-12      |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub>   | 9,0E-13       |
|   | 08.03.2018    |
|   | 15:30         |
|   | 23,6          |
|   | 09.03.2018    |
|   | 13:30         |
|   | 23,4          |
|   | 79200         |
|   | 93,0          |
|   | 94,3          |
|   | 1,3           |
|   | 8000          |
|   | 661,16        |
|   | 23,5          |
|   | 0,7102        |
|   | 2,9E-12       |
|   | 2,1E-12       |
|   | 09.03.2018    |
|   | 13:30         |
|   | 23,4          |
|   | 352200        |
|   | 93            |
|   | 99,4          |
|   | 6,4           |
|   | 8000          |
|   | 661,16        |
|   | 23,3          |
|   | 0,7135        |
|   | 3,2E-12       |
|   | 2,3E-12       |
|   | 13.03.2018    |
|   | 15:20         |
|   | 23,2          |
|   | 253800        |
|   | 92,9          |
|   | 97,5          |
|   | 4,6           |
|   | 8000          |
|   | 661,16        |
|   | 23,1          |
|   | 0,7177        |
|   | 3,2E-12       |
|   | 2,3E-12       |
|   | 16.03.2018    |
|   | 13:50         |
|   | 22,9          |
|   | 18.03.2018    |
|   | 16:00         |
|   | 23,2          |
|   | 180600        |
|   | 93            |
|   | 96,2          |
|   | 3,2           |
|   | 8000          |
|   | 661,16        |
|   | 23,1          |
|   | 0,7177        |
|   | 3,2E-12       |
|   | 2,3E-12       |



### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU |
|------------------------------|--------|
| W/Z Wert                     | 0,6    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4   |
| Durchströmte Länge l [cm]    | 11,5   |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95  |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 976,91 |

|                                 | 23.03.2018 | 23.03.2018 | 23.03.2018 | 24.03.2018 | 24.03.2018 | 26.03.2018 | 29.03.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)                  | 23.03.2018 | 23.03.2018 | 23.03.2018 | 24.03.2018 | 24.03.2018 | 26.03.2018 | 29.03.2018 |
| Versuchsbeginn                  | 09:35      | 09:35      | 13:50      | 11:05      | 11:05      | 12:10      | 10:15      |
| Temperatur (Beginn)             | 23,1       | 23,1       | 23,2       | 23,2       | 23,2       | 23,7       | 22,9       |
| Datum (Ende)                    | 24.03.2018 | 24.03.2018 | 24.03.2018 | 26.03.2018 | 26.03.2018 | 29.03.2018 | 30.03.2018 |
| Versuchsende                    | 12:50      | 12:50      | 11:05      | 12:10      | 12:10      | 10:15      | 15:25      |
| Temperatur (Ende)               | 23,3       | 23,3       | 23,2       | 22,7       | 22,7       | 22,9       | 23,1       |
| Versuchsdauer                   | 98100      | 98100      | 76500      | 176700     | 176700     | 252300     | 105000     |
| Messglass (Beginn)              | 173,2      | 173,2      | 173,2      | 173,2      | 173,2      | 173,2      | 173,2      |
| Messglass (Ende)                | 174        | 174        | 174,6      | 176,7      | 176,7      | 178        | 175,2      |
| Wassermenge                     | 0,8        | 0,8        | 1,4        | 3,5        | 3,5        | 4,8        | 2          |
| Höhendifferenz                  | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       |
| Hydraul. Gefälle                | 695,65     | 695,65     | 695,65     | 695,65     | 695,65     | 695,65     | 695,65     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,2       | 23,2       | 23,2       | 23,0       | 23,0       | 23,3       | 23,0       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7152     | 0,7152     | 0,7152     | 0,7193     | 0,7193     | 0,7135     | 0,7185     |
| Durchlässigkeit                 | 1,38E-12   | 1,38E-12   | 3,1E-12    | 3,4E-12    | 3,4E-12    | 3,2E-12    | 3,2E-12    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 9,9E-13    | 9,9E-13    | 2,2E-12    | 2,4E-12    | 2,4E-12    | 2,3E-12    | 2,3E-12    |

|   |  |   |
|---|--|---|
| <br><b>TU</b><br><b>Graz</b><br><small>Graz University of Technology</small> | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND<br/>         NUMERISCHE GEOTECHNIK</b> |  |
|---|--|---|

### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU |
|------------------------------|--------|
| W/Z Wert                     | 0,6    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4   |
| Durchströmte Länge l [cm]    | 11,7   |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95  |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 993,90 |

|                                 | 30.03.2018         | 31.03.2018         | 01.04.2018         | 03.04.2018         | 04.04.2018         |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Datum (Beginn)                  | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         |
| Versuchsbeginn                  | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            |
| Temperatur (Beginn)             | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               |
| Datum (Ende)                    | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         |
| Versuchsende                    | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            |
| Temperatur (Ende)               | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               |
| Versuchsdauer                   | [s]                | [s]                | [s]                | [s]                | [s]                |
| Messglass (Beginn)              | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                |
| Messglass (Ende)                | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                |
| Wassermenge                     | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] |
| Höhendifferenz                  | [cm]               | [cm]               | [cm]               | [cm]               | [cm]               |
| Hydraul. Gefälle                | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                |
| Temperatur Mittelwert           | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                |
| Durchlässigkeit                 | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              |





### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 0,8     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströmte Länge l [cm]    | 12      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39 |

| Datum (Beginn)                  | 28.04.2018 | 29.04.2018 | 30.04.2018 | 01.05.2018 | 02.05.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Versuchsbeginn                  | 17:15      | 13:15      | 23:15      | 21:55      | 19:15      |
| Temperatur (Beginn)             | 24,9       | 23,4       | 22,6       | 22,7       | 23,7       |
| Datum (Ende)                    | 29.04.2018 | 30.04.2018 | 01.05.2018 | 02.05.2018 | 04.05.2018 |
| Versuchsende                    | 13:15      | 23:15      | 21:55      | 19:15      | 20:00      |
| Temperatur (Ende)               | 23,4       | 22,6       | 22,7       | 23,7       | 22,8       |
| Versuchsdauer                   | 72000      | 122400     | 81600      | 76800      | 175500     |
| Messglass (Beginn)              | 93,1       | 92,6       | 90,9       | 93,5       | 175,4      |
| Messglass (Ende)                | 93,7       | 94,9       | 92,9       | 95,5       | 180        |
| Wassermenge                     | 0,6        | 2,3        | 2          | 2          | 4,6        |
| Höhendifferenz                  | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       |
| Hydraul. Gefälle                | 666,67     | 666,67     | 666,67     | 666,67     | 666,67     |
| Temperatur Mittelwert           | 24,2       | 23,0       | 22,7       | 23,2       | 23,3       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,6997     | 0,7185     | 0,7243     | 0,7152     | 0,7143     |
| Durchlässigkeit                 | 1,47E-12   | 3,3E-12    | 4,3E-12    | 4,6E-12    | 4,6E-12    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 1,0E-12    | 2,4E-12    | 3,1E-12    | 3,3E-12    | 3,3E-12    |

|  |  |   |
|--|--|---|
| <br><b>TU</b><br>Graz<br>University of Technology | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND<br/>         NUMERISCHE GEOTECHNIK</b> |  |
|--|--|---|

### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 0,8     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströmte Länge l [cm]    | 12      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39 |

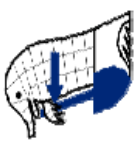
|                                 | 24.04.2018         | 25.04.2018 | 27.04.2018 | 28.04.2018 | 01.05.2018 |
|---------------------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)                  | 10:35              | 17:35      | 13:33      | 20:12      | 22:30      |
| Versuchsbeginn                  | [hh:mm]            |            |            |            |            |
| Temperatur (Beginn)             | 24,1               | 23,8       | 24,2       | 23,1       | 23,3       |
| Temperatur (Ende)               | [°C]               |            |            |            |            |
| Datum (Ende)                    | 25.04.2018         | 26.04.2018 | 28.04.2018 | 01.05.2018 | 03.05.2018 |
| Versuchsende                    | [TT.MM.JJ]         |            |            |            |            |
| Temperatur (Ende)               | 11:35              | 14:37      | 22:30      | 22:30      | 20:55      |
| Versuchsdauer                   | [hh:mm]            |            |            |            |            |
| Messglass (Beginn)              | 23,8               | 24,2       | 23,1       | 23,3       | 22,6       |
| Messglass (Ende)                | [°C]               |            |            |            |            |
| Wassermenge                     | 90000              | 75720      | 118620     | 267480     | 167100     |
| Höhendifferenz                  | [s]                |            |            |            |            |
| Hydraul. Gefälle                | 173,2              | 173,2      | 173,2      | 173,2      | 173,1      |
| Temperatur Mittelwert           | [g]                |            |            |            |            |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 174                | 174,6      | 176,3      | 180,1      | 177,5      |
| Durchlässigkeit                 | [g]                |            |            |            |            |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 0,8                | 1,4        | 3,1        | 6,9        | 4,4        |
|                                 | [cm <sup>3</sup> ] |            |            |            |            |
|                                 | 8000               | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       |
|                                 | [cm]               |            |            |            |            |
|                                 | 666,67             | 666,67     | 666,67     | 666,67     | 666,67     |
|                                 | [l]                |            |            |            |            |
|                                 | 24,0               | 24,0       | 23,7       | 23,2       | 23,0       |
|                                 | [°C]               |            |            |            |            |
|                                 | 0,7029             | 0,7021     | 0,7078     | 0,7152     | 0,7193     |
|                                 | [l]                |            |            |            |            |
|                                 | 1,57E-12           | 3,3E-12    | 4,6E-12    | 4,6E-12    | 4,6E-12    |
|                                 | [m/s]              |            |            |            |            |
|                                 | 1,1E-12            | 2,3E-12    | 3,3E-12    | 3,3E-12    | 3,3E-12    |
|                                 | [m/s]              |            |            |            |            |



### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 0,8     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströme Länge l [cm]     | 11,9    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1010,89 |

| Datum (Beginn)                  | 02.04.2018 | 03.04.2018 | 04.04.2018 | 06.04.2018 | 08.04.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Versuchsbeginn                  | 09:45      | 10:30      | 13:35      | 22:10      | 21:15      |
| Temperatur (Beginn)             | 23,2       | 23,4       | 25,4       | 23,1       | 23,2       |
| Datum (Ende)                    | 03.04.2018 | 04.04.2018 | 06.04.2018 | 08.04.2018 | 10.04.2018 |
| Versuchsende                    | 10:30      | 13:35      | 22:10      | 21:15      | 23:35      |
| Temperatur (Ende)               | 23,4       | 25,4       | 23,1       | 23,2       | 23         |
| Versuchsdauer                   | 89100      | 97500      | 203700     | 169500     | 181200     |
| Messglass (Beginn)              | 173,2      | 173,2      | 173,2      | 173,2      | 173,2      |
| Messglass (Ende)                | 174,1      | 175,1      | 178,7      | 177,6      | 178        |
| Wassermenge                     | 0,9        | 1,9        | 5,5        | 4,4        | 4,8        |
| Höhendifferenz                  | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       |
| Hydraul. Gefälle                | 672,27     | 672,27     | 672,27     | 672,27     | 672,27     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,3       | 24,4       | 24,3       | 23,2       | 23,1       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7135     | 0,6958     | 0,6981     | 0,7160     | 0,7168     |
| Durchlässigkeit                 | 1,77E-12   | 3,4E-12    | 4,7E-12    | 4,5E-12    | 4,6E-12    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 1,3E-12    | 2,4E-12    | 3,3E-12    | 3,3E-12    | 3,3E-12    |

|   |   |
|---|---|
|  |  |
| <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND<br/>NUMERISCHE GEOTECHNIK</b>           |   |

### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1       |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströmte Länge l [cm]    | 12      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39 |

|                                 | 04.05.2018 | 05.05.2018 | 06.05.2018 | 08.05.2018 | 09.05.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)                  | 09:45      | 11:15      | 14:15      | 19:20      | 23:15      |
| Versuchsbeginn                  | [hh:mm]    | [hh:mm]    | [hh:mm]    | [hh:mm]    | [hh:mm]    |
| Temperatur (Beginn)             | 22,9       | 23,3       | 25,6       | 23,1       | 23,3       |
| Datum (Ende)                    | 05.05.2018 | 06.05.2018 | 08.05.2018 | 09.05.2018 | 12.05.2018 |
| Versuchsende                    | 11:15      | 14:15      | 19:20      | 23:15      | 20:35      |
| Temperatur (Ende)               | 23,3       | 25,6       | 23,1       | 23,5       | 22,7       |
| Versuchsdauer                   | 91800      | 97200      | 191100     | 100500     | 249600     |
| Messglass (Beginn)              | 173,2      | 173,4      | 173,5      | 173,7      | 173,2      |
| Messglass (Ende)                | 174,6      | 175,9      | 179,9      | 177,1      | 181,7      |
| Wassermenge                     | 1,4        | 2,5        | 6,4        | 3,4        | 8,5        |
| Höhendifferenz                  | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       |
| Hydraul. Gefälle                | 666,67     | 666,67     | 666,67     | 666,67     | 666,67     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,1       | 24,5       | 24,4       | 23,3       | 23,0       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7168     | 0,6950     | 0,6966     | 0,7135     | 0,7185     |
| Durchlässigkeit                 | 2,69E-12   | 4,5E-12    | 5,9E-12    | 6,0E-12    | 6,0E-12    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 1,9E-12    | 3,2E-12    | 4,1E-12    | 4,3E-12    | 4,3E-12    |



### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1       |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströmte Länge l [cm]    | 12      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39 |

|                                 | 13.05.2018 | 14.05.2018 | 16.05.2018 | 18.05.2018 | 20.05.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)                  | 13.05.2018 | 14.05.2018 | 16.05.2018 | 18.05.2018 | 20.05.2018 |
| Versuchsbeginn                  | 09:45      | 11:15      | 14:15      | 19:20      | 23:15      |
| Temperatur (Beginn)             | 22,9       | 23,1       | 23,6       | 23,1       | 23,2       |
| Datum (Ende)                    | 14.05.2018 | 16.05.2018 | 18.05.2018 | 20.05.2018 | 22.05.2018 |
| Versuchsende                    | 08:15      | 14:15      | 19:20      | 23:15      | 20:35      |
| Temperatur (Ende)               | 23,1       | 23,6       | 23,1       | 23,2       | 22,9       |
| Versuchsdauer                   | 81000      | 183600     | 191100     | 186900     | 163200     |
| Messglass (Beginn)              | 173,2      | 173,4      | 173,5      | 173,7      | 173,2      |
| Messglass (Ende)                | 174,5      | 179,1      | 180,1      | 180,1      | 178,7      |
| Wassermenge                     | 1,3        | 5,7        | 6,6        | 6,4        | 5,5        |
| Höhendifferenz                  | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       |
| Hydraul. Gefälle                | 666,67     | 666,67     | 666,67     | 666,67     | 666,67     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,0       | 23,4       | 23,4       | 23,2       | 23,1       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7185     | 0,7127     | 0,7127     | 0,7160     | 0,7177     |
| Durchlässigkeit                 | 2,83E-12   | 5,5E-12    | 6,1E-12    | 6,0E-12    | 6,0E-12    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 2,0E-12    | 3,9E-12    | 4,3E-12    | 4,3E-12    | 4,3E-12    |



### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1       |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströmte Länge l [cm]    | 12      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39 |

|                                 | 22.05.2018 | 23.05.2018 | 24.05.2018 | 26.05.2018 | 28.05.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)                  | [TT.MM.JJ] | [TT.MM.JJ] | [TT.MM.JJ] | [TT.MM.JJ] | [TT.MM.JJ] |
| Versuchsbeginn                  | 09:45      | 11:15      | 14:15      | 19:20      | 23:15      |
| Temperatur (Beginn)             | 22,9       | 23,3       | 25,6       | 23,1       | 23,1       |
| Datum (Ende)                    | 23.05.2018 | 24.05.2018 | 26.05.2018 | 28.05.2018 | 01.06.2018 |
| Versuchsende                    | 10:35      | 14:15      | 19:20      | 23:15      | 20:35      |
| Temperatur (Ende)               | 23,3       | 25,6       | 23,1       | 23,3       | 22,7       |
| Versuchsdauer                   | 89400      | 97200      | 191100     | 186900     | 336000     |
| Messglass (Beginn)              | 173,2      | 173,4      | 173,5      | 173,7      | 173,2      |
| Messglass (Ende)                | 174,5      | 176,2      | 180,2      | 180        | 184,9      |
| Wassermenge                     | 1,3        | 2,8        | 6,7        | 6,3        | 11,7       |
| Höhendifferenz                  | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       | 8000       |
| Hydraul. Gefälle                | 666,67     | 666,67     | 666,67     | 666,67     | 666,67     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,1       | 24,5       | 24,4       | 23,2       | 22,9       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7168     | 0,6950     | 0,6966     | 0,7152     | 0,7202     |
| Durchlässigkeit                 | 2,57E-12   | 5,1E-12    | 6,2E-12    | 6,0E-12    | 6,1E-12    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 1,8E-12    | 3,5E-12    | 4,3E-12    | 4,3E-12    | 4,4E-12    |



### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU |
|------------------------------|--------|
| W/Z Wert                     | 1,2    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3   |
| Durchströme Länge l [cm]     | 12     |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32  |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 999,88 |

| Datum (Beginn)                  | 08.06.2018 | 09.06.2018 | 11.06.2018 | 12.06.2018 | 13.06.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Versuchsbeginn                  | 12:55      | 17:00      | 11:35      | 14:50      | 21:55      |
| Temperatur (Beginn)             | 23,4       | 24,1       | 24,2       | 25,7       | 26,1       |
| Datum (Ende)                    | 09.06.2018 | 11.06.2018 | 12.06.2018 | 13.06.2018 | 14.06.2018 |
| Versuchsende                    | 17:00      | 11:35      | 14:50      | 21:55      | 15:20      |
| Temperatur (Ende)               | 24,1       | 24,2       | 25,7       | 26,1       | 23,2       |
| Versuchsdauer                   | 101100     | 153300     | 98100      | 111900     | 62700      |
| Messglass (Beginn)              | 173,2      | 177,5      | 180,3      | 81         | 79,5       |
| Messglass (Ende)                | 174,5      | 181,6      | 184,4      | 86,1       | 82,3       |
| Wassermenge                     | 1,3        | 4,1        | 4,1        | 5,1        | 2,8        |
| Höhendifferenz                  | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       |
| Hydraul. Gefälle                | 166,67     | 166,67     | 166,67     | 166,67     | 166,67     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,8       | 24,2       | 25,0       | 25,9       | 24,7       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7062     | 0,6997     | 0,6871     | 0,6726     | 0,6918     |
| Durchlässigkeit                 | 9,26E-12   | 1,9E-11    | 3,0E-11    | 3,3E-11    | 3,2E-11    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 6,5E-12    | 1,3E-11    | 2,1E-11    | 2,2E-11    | 2,2E-11    |





### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1,2     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströme Länge I [cm]     | 11,9    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1010,89 |

|                          | 08.06.2018 | 09.06.2018 | 11.06.2018 | 12.06.2018 | 13.06.2018 |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)           | 08.06.2018 | 09.06.2018 | 11.06.2018 | 12.06.2018 | 13.06.2018 |
| Versuchsbeginn           | 12:55      | 17:00      | 11:35      | 14:50      | 21:55      |
| Temperatur (Beginn)      | $t_1$      | 23,4       | 24,1       | 24,2       | 25,7       |
| Datum (Ende)             | 09.06.2018 | 11.06.2018 | 12.06.2018 | 13.06.2018 | 14.06.2018 |
| Versuchsende             | 17:00      | 11:35      | 14:50      | 21:55      | 15:20      |
| Temperatur (Ende)        | $\delta_1$ | 24,1       | 24,2       | 26,1       | 23,2       |
| Versuchsdauer            | t          | 101100     | 153300     | 111900     | 62700      |
| Messglass (Beginn)       | $m_1$      | 173,2      | 177,4      | 180,2      | 79,7       |
| Messglass (Ende)         | $m_2$      | 174,7      | 182,6      | 184,8      | 82,5       |
| Wassermenge              | Q          | 1,5        | 5,2        | 4,6        | 5,3        |
| Höhendifferenz           | $\Delta H$ | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       |
| Hydraul. Gefälle         | i          | 168,07     | 168,07     | 168,07     | 168,07     |
| Temperatur Mittelwert    | $\delta$   | 23,8       | 24,2       | 25,0       | 24,7       |
| $F_k$ Temp ( $\alpha$ )  |            | 0,7062     | 0,6997     | 0,6871     | 0,6918     |
| Durchlässigkeit          | $k_8$      | 1,04E-11   | 2,4E-11    | 3,3E-11    | 3,1E-11    |
| Durchlässigkeit $k_{10}$ | $k_{10}$   | 7,3E-12    | 1,7E-11    | 2,3E-11    | 2,2E-11    |


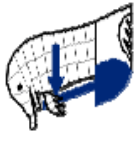




### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU |
|------------------------------|--------|
| W/Z Wert                     | 1,2    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4   |
| Durchströme Länge l [cm]     | 11,6   |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95  |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 985,41 |



| Datum (Beginn)           | 08.06.2018 | 09.06.2018 | 11.06.2018 | 12.06.2018 | 13.06.2018 |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Versuchsbeginn           | 12:55      | 17:00      | 11:40      | 14:50      | 21:55      |
| Temperatur (Beginn)      | 23,4       | 24,1       | 24,2       | 25,7       | 26,1       |
| Datum (Ende)             | 09.06.2018 | 11.06.2018 | 12.06.2018 | 13.06.2018 | 14.06.2018 |
| Versuchsende             | 17:00      | 11:40      | 14:50      | 21:55      | 15:20      |
| Temperatur (Ende)        | 24,1       | 24,2       | 25,7       | 26,1       | 23,2       |
| Versuchsdauer            | 101100     | 153600     | 97800      | 111900     | 62700      |
| Messglass (Beginn)       | 172,2      | 176,3      | 180        | 81         | 77,9       |
| Messglass (Ende)         | 174,1      | 181,5      | 184,5      | 86,4       | 80,8       |
| Wassermenge              | 1,9        | 5,2        | 4,5        | 5,4        | 2,9        |
| Höhendifferenz           | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       |
| Hydraul. Gefälle         | 172,41     | 172,41     | 172,41     | 172,41     | 172,41     |
| Temperatur Mittelwert    | 23,8       | 24,2       | 25,0       | 25,9       | 24,7       |
| Fk Temp ( $\alpha$ )     | 0,7062     | 0,6997     | 0,6871     | 0,6726     | 0,6918     |
| Durchlässigkeit          | 1,28E-11   | 2,3E-11    | 3,1E-11    | 3,3E-11    | 3,2E-11    |
| Durchlässigkeit $k_{10}$ | 9,1E-12    | 1,6E-11    | 2,2E-11    | 2,2E-11    | 2,2E-11    |

|  |  |   |
|--|--|---|
| <br><b>TU</b><br>Graz<br>University of Technology | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND<br/>         NUMERISCHE GEOTECHNIK</b> |  |
|--|--|---|

### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1,4     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströme Länge l [cm]     | 12,2    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1036,38 |


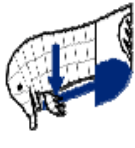
|                                 | 15.06.2018         | 16.06.2018 | 18.06.2018 | 19.06.2018 | 21.06.2018 |
|---------------------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)                  | 15.06.2018         | 16.06.2018 | 18.06.2018 | 19.06.2018 | 21.06.2018 |
| Versuchsbeginn                  | [hh:mm]            | 16:10      | 15:00      | 11:10      | 12:20      |
| Temperatur (Beginn)             | [°C]               | 22,9       | 22,3       | 23,3       | 23,7       |
| Datum (Ende)                    | [TT.MM.JJ]         | 16.06.2018 | 18.06.2018 | 19.06.2018 | 21.06.2018 |
| Versuchsende                    | [hh:mm]            | 15:00      | 11:10      | 12:20      | 16:35      |
| Temperatur (Ende)               | [°C]               | 22,3       | 23,3       | 23,7       | 26,1       |
| Versuchsdauer                   | [s]                | 82200      | 159000     | 90600      | 188100     |
| Messglass (Beginn)              | [g]                | 219,0      | 173,3      | 81,6       | 177,9      |
| Messglass (Ende)                | [g]                | 220,2      | 180,1      | 86,9       | 189,6      |
| Wassermenge                     | [cm <sup>3</sup> ] | 1,2        | 6,8        | 5,3        | 11,7       |
| Höhendifferenz                  | [cm]               | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       |
| Hydraul. Gefälle                | [l]                | 163,93     | 163,93     | 163,93     | 163,93     |
| Temperatur Mittelwert           | [°C]               | 22,6       | 22,8       | 23,5       | 24,9       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | [l]                | 0,7252     | 0,7218     | 0,7102     | 0,6879     |
| Durchlässigkeit                 | [m/s]              | 1,05E-11   | 3,1E-11    | 4,2E-11    | 4,5E-11    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | [m/s]              | 7,6E-12    | 2,2E-11    | 3,0E-11    | 3,1E-11    |

|   |  |   |
|---|--|---|
| <br><b>TU</b><br>Graz<br>Graz University of Technology | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND<br/>         NUMERISCHE GEOTECHNIK</b> |  |
|---|--|---|

### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU |
|------------------------------|--------|
| W/Z Wert                     | 1,4    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3   |
| Durchströmte Länge l [cm]    | 11,8   |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32  |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 983,21 |

|                                 | 15.06.2018 | 16.06.2018 | 18.06.2018 | 19.06.2018 | 21.06.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)                  | 15.06.2018 | 16.06.2018 | 18.06.2018 | 19.06.2018 | 21.06.2018 |
| Versuchsbeginn                  | 16:10      | 15:00      | 11:10      | 12:20      | 16:35      |
| Temperatur (Beginn)             | 22,9       | 22,3       | 23,3       | 23,7       | 26,1       |
| Datum (Ende)                    | 16.06.2018 | 18.06.2018 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 22.06.2018 |
| Versuchsende                    | 15:00      | 11:10      | 12:20      | 16:35      | 19:10      |
| Temperatur (Ende)               | 22,3       | 23,3       | 23,7       | 26,1       | 25,1       |
| Versuchsdauer                   | 82200      | 159000     | 90600      | 188100     | 95700      |
| Messglass (Beginn)              | 220,0      | 173,0      | 82,8       | 179        | 175,4      |
| Messglass (Ende)                | 221,9      | 181,2      | 87,9       | 190,6      | 181,3      |
| Wassermenge                     | 1,9        | 8,2        | 5,1        | 11,6       | 5,9        |
| Höhendifferenz                  | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       |
| Hydraul. Gefälle                | 169,49     | 169,49     | 169,49     | 169,49     | 169,49     |
| Temperatur Mittelwert           | 22,6       | 22,8       | 23,5       | 24,9       | 25,6       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7252     | 0,7218     | 0,7102     | 0,6879     | 0,6772     |
| Durchlässigkeit                 | 1,64E-11   | 3,7E-11    | 4,0E-11    | 4,4E-11    | 4,4E-11    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 1,2E-11    | 2,6E-11    | 2,8E-11    | 3,0E-11    | 3,0E-11    |

|  |  |   |
|--|--|---|
| <br><b>TU</b><br>Graz<br>University of Technology | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND<br/>         NUMERISCHE GEOTECHNIK</b> |  |
|--|--|---|

### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1,4     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströme Länge l [cm]     | 12,2    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1036,38 |

|                                 | 15.06.2018         | 16.06.2018         | 18.06.2018         | 19.06.2018         | 21.06.2018         |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Datum (Beginn)                  | 15.06.2018         | 16.06.2018         | 18.06.2018         | 19.06.2018         | 21.06.2018         |
| Versuchsbeginn                  | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            |
| Temperatur (Beginn)             | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               |
| Datum (Ende)                    | 16.06.2018         | 18.06.2018         | 19.06.2018         | 21.06.2018         | 22.06.2018         |
| Versuchsende                    | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            |
| Temperatur (Ende)               | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               |
| Versuchsdauer                   | [s]                | [s]                | [s]                | [s]                | [s]                |
| Messglass (Beginn)              | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                |
| Messglass (Ende)                | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                |
| Wassermenge                     | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] |
| Höhendifferenz                  | [cm]               | [cm]               | [cm]               | [cm]               | [cm]               |
| Hydraul. Gefälle                | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                |
| Temperatur Mittelwert           | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                |
| Durchlässigkeit                 | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              |

|  |  |   |
|--|--|---|
| <br><b>TU</b><br>Graz<br>University of Technology | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND<br/>         NUMERISCHE GEOTECHNIK</b> |  |
|--|--|---|

### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1,6     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströmte Länge l [cm]    | 12      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39 |


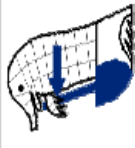
|                                  | 22.06.2018         | 23.06.2018         | 25.06.2018         | 27.06.2018         | 28.06.2018         |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Datum (Beginn)                   | 09:30              | 11:10              | 07:35              | 11:20              | 16:15              |
| Versuchsbeginn                   | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            |
| Temperatur (Beginn)              | 23,2               | 23,5               | 23,1               | 24,8               | 24,9               |
| Temperatur (Ende)                | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               |
| Datum (Ende)                     | 23.06.2018         | 25.06.2018         | 27.06.2018         | 28.06.2018         | 30.06.2018         |
| Versuchsende                     | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         | [TT.MM.JJ]         |
| Temperatur (Ende)                | 11:10              | 07:35              | 11:20              | 16:15              | 12:50              |
| Versuchsdauer                    | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            | [hh:mm]            |
| Messglass (Beginn)               | 92400              | 159900             | 186300             | 104100             | 160500             |
| Messglass (Ende)                 | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                |
| Wassermenge                      | 173,1              | 173,0              | 173,3              | 173,2              | 173,2              |
| Höhendifferenz                   | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                | [g]                |
| Hydraul. Gefälle                 | 175,3              | 182,9              | 187,9              | 181,9              | 232,6              |
| Temperatur Mittelwert            | 2,2                | 9,9                | 14,6               | 8,7                | 59,4               |
| F <sub>k</sub> Temp (α)          | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] | [cm <sup>3</sup> ] |
| Durchlässigskeit                 | 2000               | 2000               | 2000               | 2000               | 2000               |
| Durchlässigskeit k <sub>10</sub> | [cm]               | [cm]               | [cm]               | [cm]               | [cm]               |
|                                  | 166,67             | 166,67             | 166,67             | 166,67             | 166,67             |
|                                  | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                |
|                                  | 23,4               | 23,3               | 24,0               | 24,9               | 124,9              |
|                                  | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [°C]               |
|                                  | 0,7127             | 0,7135             | 0,7029             | 0,6887             | 0,1574             |
|                                  | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                | [l]                |
|                                  | 1,68E-11           | 4,4E-11            | 5,5E-11            | 5,9E-11            | 2,6E-10            |
|                                  | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              |
|                                  | 1,2E-11            | 3,1E-11            | 3,9E-11            | 4,1E-11            | 4,1E-11            |
|                                  | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              | [m/s]              |



### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1,6     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströmlänge I [cm]       | 11,8    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1002,40 |

| Datum (Beginn)                  | 22.06.2018 | 23.06.2018 | 25.06.2018 | 27.06.2018 | 28.06.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Versuchsbeginn                  | 09:30      | 11:10      | 07:35      | 11:20      | 16:15      |
| Temperatur (Beginn)             | 23,2       | 23,5       | 23,1       | 24,8       | 24,9       |
| Datum (Ende)                    | 23.06.2018 | 25.06.2018 | 27.06.2018 | 28.06.2018 | 30.06.2018 |
| Versuchsende                    | 11:10      | 07:35      | 11:20      | 16:15      | 12:50      |
| Temperatur (Ende)               | 23,5       | 23,1       | 24,8       | 24,9       | 224,8      |
| Versuchsdauer                   | 92400      | 159900     | 186300     | 104100     | 160500     |
| Messglass (Beginn)              | 169,1      | 183,1      | 177,3      | 170,5      | 171,9      |
| Messglass (Ende)                | 172,4      | 192,9      | 191,9      | 179,9      | 234,9      |
| Wassermenge                     | 3,3        | 9,8        | 14,6       | 9,4        | 63         |
| Höhendifferenz                  | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       |
| Hydraul. Gefälle                | 169,49     | 169,49     | 169,49     | 169,49     | 169,49     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,4       | 23,3       | 24,0       | 24,9       | 124,9      |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7127     | 0,7135     | 0,7029     | 0,6887     | 0,1574     |
| Durchlässigkeit                 | 2,48E-11   | 4,3E-11    | 5,4E-11    | 6,3E-11    | 2,7E-10    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 1,8E-11    | 3,0E-11    | 3,8E-11    | 4,3E-11    | 4,3E-11    |

|  |  |   |
|--|--|---|
| <br><b>TU</b><br>Graz<br>University of Technology | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK, GRUNDBAU UND<br/>         NUMERISCHE GEOTECHNIK</b> |  |
|--|--|---|

### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1,6     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströme Länge l [cm]     | 12      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39 |

|                                 | 22.06.2018 | 23.06.2018 | 25.06.2018 | 27.06.2018 | 28.06.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)                  | 09:30      | 11:14      | 07:40      | 11:23      | 16:30      |
| Versuchsbeginn                  | 23,2       | 23,5       | 23,1       | 24,8       | 24,9       |
| Temperatur (Beginn)             | [°C]       | [°C]       | [°C]       | [°C]       | [°C]       |
| Datum (Ende)                    | 23.06.2018 | 25.06.2018 | 27.06.2018 | 28.06.2018 | 30.06.2018 |
| Versuchsende                    | 11:14      | 07:40      | 11:23      | 16:30      | 13:00      |
| Temperatur (Ende)               | 23,5       | 23,1       | 24,8       | 24,9       | 224,8      |
| Versuchsdauer                   | 92640      | 159960     | 186180     | 104820     | 160200     |
| Messglass (Beginn)              | 167,2      | 177,1      | 175,7      | 180        | 169,7      |
| Messglass (Ende)                | 170        | 186,9      | 190,9      | 189,3      | 232,2      |
| Wassermenge                     | 2,8        | 9,8        | 15,2       | 9,3        | 62,5       |
| Höhendifferenz                  | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       |
| Hydraul. Gefälle                | 166,67     | 166,67     | 166,67     | 166,67     | 166,67     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,4       | 23,3       | 24,0       | 24,9       | 124,9      |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7127     | 0,7135     | 0,7029     | 0,6887     | 0,1574     |
| Durchlässigkeit                 | 2,13E-11   | 4,3E-11    | 5,8E-11    | 6,3E-11    | 2,8E-10    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 1,5E-11    | 3,1E-11    | 4,1E-11    | 4,3E-11    | 4,3E-11    |



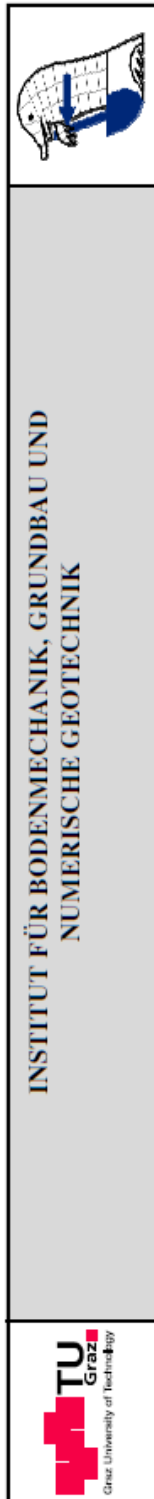


### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1,8     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströme Länge l [cm]     | 12      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39 |

|                                 | 01.07.2018 | 02.07.2018 | 03.07.2018 | 04.07.2018 | 05.07.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)                  | 08:20      | 13:30      | 13:35      | 11:20      | 10:45      |
| Versuchsbeginn                  | 22,7       | 22,5       | 22,8       | 22,9       | 22,3       |
| Temperatur (Beginn)             | [°C]       | [°C]       | [°C]       | [°C]       | [°C]       |
| Datum (Ende)                    | 02.07.2018 | 03.07.2018 | 04.07.2018 | 05.07.2018 | 06.07.2018 |
| Versuchsende                    | 13:30      | 13:35      | 11:20      | 10:45      | 09:30      |
| Temperatur (Ende)               | 24,7       | 25,6       | 23,9       | 23,8       | 23,5       |
| Versuchsdauer                   | 105000     | 86700      | 78300      | 84300      | 81900      |
| Messglass (Beginn)              | 173,2      | 173,2      | 173,2      | 173,2      | 173,2      |
| Messglass (Ende)                | 191,5      | 195,9      | 202,9      | 206,2      | 204,1      |
| Wassermenge                     | 18,3       | 22,7       | 29,7       | 33         | 30,9       |
| Höhendifferenz                  | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       |
| Hydraul. Gefälle                | 166,67     | 166,67     | 166,67     | 166,67     | 166,67     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,7       | 24,1       | 23,4       | 23,4       | 22,9       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7070     | 0,7013     | 0,7127     | 0,7127     | 0,7202     |
| Durchlässigkeit                 | 1,23E-10   | 1,8E-10    | 2,7E-10    | 2,8E-10    | 2,7E-10    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 8,7E-11    | 1,3E-10    | 1,9E-10    | 2,0E-10    | 1,9E-10    |





### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1,8     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströmte Länge l [cm]    | 11,8    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1002,40 |

|                                 | 01.07.2018 | 02.07.2018 | 03.07.2018 | 04.07.2018 | 05.07.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Datum (Beginn)                  | 08:20      | 13:30      | 13:35      | 11:20      | 10:45      |
| Versuchsbeginn                  | 22,7       | 22,5       | 22,8       | 22,9       | 22,3       |
| Temperatur (Beginn)             | [TT-MM.JJ] | [TT-MM.JJ] | [TT-MM.JJ] | [TT-MM.JJ] | [TT-MM.JJ] |
| Datum (Ende)                    | 13:30      | 03.07.2018 | 04.07.2018 | 05.07.2018 | 06.07.2018 |
| Versuchsende                    | 13:30      | 13:35      | 11:20      | 10:45      | 09:30      |
| Temperatur (Ende)               | 24,7       | 25,6       | 23,9       | 23,8       | 23,5       |
| Versuchsdauer                   | 105000     | 86700      | 78300      | 84300      | 81900      |
| Messglass (Beginn)              | 174,4      | 175,7      | 170,1      | 174,2      | 176,7      |
| Messglass (Ende)                | 191,1      | 204,9      | 202,8      | 210,2      | 211,1      |
| Wassermenge                     | 16,7       | 29,2       | 32,7       | 36         | 34,4       |
| Höhendifferenz                  | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       |
| Hydraul. Gefälle                | 169,49     | 169,49     | 169,49     | 169,49     | 169,49     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,7       | 24,1       | 23,4       | 23,4       | 22,9       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7070     | 0,7013     | 0,7127     | 0,7127     | 0,7202     |
| Durchlässigkeit                 | 1,10E-10   | 2,3E-10    | 2,9E-10    | 3,0E-10    | 2,9E-10    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 7,8E-11    | 1,6E-10    | 2,1E-10    | 2,1E-10    | 2,1E-10    |



### DURCHLÄSSIGKEIT IN DER TRIAXIALEN DURCHLÄSSIGKEITZELLE

| PROBE                        | EINBAU  |
|------------------------------|---------|
| W/Z Wert                     | 1,8     |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4    |
| Durchströme Länge l [cm]     | 12,1    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95   |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1027,88 |

| Datum (Beginn)                  | 01.07.2018 | 02.07.2018 | 03.07.2018 | 04.07.2018 | 05.07.2018 |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Versuchsbeginn                  | 08:20      | 13:30      | 13:35      | 11:20      | 10:45      |
| Temperatur (Beginn)             | 22,7       | 22,5       | 22,8       | 22,9       | 22,3       |
| Datum (Ende)                    | 02.07.2018 | 03.07.2018 | 04.07.2018 | 05.07.2018 | 06.07.2018 |
| Versuchsende                    | 13:30      | 13:35      | 11:20      | 10:45      | 09:30      |
| Temperatur (Ende)               | 24,7       | 25,6       | 23,9       | 23,8       | 23,5       |
| Versuchsdauer                   | 105000     | 86700      | 78300      | 84300      | 81900      |
| Messglass (Beginn)              | 171,0      | 176,5      | 174,2      | 176,3      | 178,2      |
| Messglass (Ende)                | 186,9      | 210        | 205,8      | 210,2      | 210,1      |
| Wassermenge                     | 15,9       | 33,5       | 31,6       | 33,9       | 31,9       |
| Höhendifferenz                  | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       | 2000       |
| Hydraul. Gefälle                | 165,29     | 165,29     | 165,29     | 165,29     | 165,29     |
| Temperatur Mittelwert           | 23,7       | 24,1       | 23,4       | 23,4       | 22,9       |
| F <sub>k</sub> Temp (α)         | 0,7070     | 0,7013     | 0,7127     | 0,7127     | 0,7202     |
| Durchlässigkeit                 | 1,08E-10   | 2,8E-10    | 2,9E-10    | 2,9E-10    | 2,8E-10    |
| Durchlässigkeit k <sub>10</sub> | 7,6E-11    | 1,9E-10    | 2,0E-10    | 2,0E-10    | 2,0E-10    |


**INSTITUT FÜR BODENMECHANIK,  
GRUNDBAU UND NUMERISCHE  
GEOTECHNIK**

**KAPILLARMESSUNG**

| <b>PROBE I</b>               | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 5,7E-12                                    |
| W/Z Wert                     | 0,6           | 48             | 4,8E-12                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 3,6E-12                                    |
| Durchströmte Länge I [cm]    | 12            | 144            | 3,3E-12                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 3E-12                                      |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 999,88        | 192            | 3E-12                                      |

| <b>PROBE II</b>              | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 5,2E-12                                    |
| W/Z Wert                     | 0,6           | 48             | 4E-12                                      |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 3,8E-12                                    |
| Durchströmte Länge I [cm]    | 12,1          | 144            | 3,4E-12                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 2,9E-12                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1008,21       | 192            | 2,9E-12                                    |

| <b>PROBE III</b>             | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 6,1E-12                                    |
| W/Z Wert                     | 0,6           | 48             | 4,3E-12                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4          | 72             | 3,7E-12                                    |
| Durchströmte Länge I [cm]    | 11,5          | 144            | 3,1E-12                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95         | 168            | 3,2E-12                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 976,91        | 192            | 3,2E-12                                    |


**KAPILLARMESSUNG**

| <b>PROBE I</b>               | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 5,9E-12                                    |
| W/Z Wert                     | 0,8           | 48             | 5,1E-12                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,2          | 72             | 4,4E-12                                    |
| Durchströmte Länge I [cm]    | 12,2          | 144            | 3,9E-12                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 81,71         | 168            | 3,8E-12                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 996,90        | 192            | 3,9E-12                                    |

| <b>PROBE II</b>              | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 5E-12                                      |
| W/Z Wert                     | 0,8           | 48             | 4,7E-12                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4          | 72             | 4E-12                                      |
| Durchströmte Länge I [cm]    | 11,8          | 144            | 4E-12                                      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95         | 168            | 3,7E-12                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1002,40       | 192            | 3,7E-12                                    |

| <b>PROBE III</b>             | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 5,5E-12                                    |
| W/Z Wert                     | 0,8           | 48             | 4,3E-12                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4          | 72             | 3,7E-12                                    |
| Durchströmte Länge I [cm]    | 12,1          | 144            | 3,9E-12                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95         | 168            | 3,9E-12                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1027,88       | 192            | 3,9E-12                                    |


**KAPILLARMESSUNG**

| <b>PROBE I</b>               | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 6,5E-12                                    |
| W/Z Wert                     | 1,0           | 48             | 5,8E-12                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 5,4E-12                                    |
| Durchströmte Länge I [cm]    | 12,1          | 144            | 5,1E-12                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 5,2E-12                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1008,21       | 192            | 5,2E-12                                    |

| <b>PROBE II</b>              | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 6,7E-12                                    |
| W/Z Wert                     | 1,0           | 48             | 5,6E-12                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 5,3E-12                                    |
| Durchströmte Länge I [cm]    | 12            | 144            | 5,4E-12                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 5,1E-12                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 999,88        | 192            | 5,1E-12                                    |

| <b>PROBE III</b>             | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 7E-12                                      |
| W/Z Wert                     | 1,0           | 48             | 5,4E-12                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4          | 72             | 5,2E-12                                    |
| Durchströmte Länge I [cm]    | 12            | 144            | 4,8E-12                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95         | 168            | 4,9E-12                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39       | 192            | 4,9E-12                                    |


**KAPILLARMESSUNG**

| <b>PROBE I</b>               | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 4,8E-11                                    |
| W/Z Wert                     | 1,2           | 48             | 4,6E-11                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 4,3E-11                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 12            | 144            | 3,4E-11                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 3,4E-11                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 999,88        | 192            | 3,4E-11                                    |

| <b>PROBE II</b>              | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 5E-11                                      |
| W/Z Wert                     | 1,2           | 48             | 4,6E-11                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4          | 72             | 4E-11                                      |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 11,9          | 144            | 3,6E-11                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95         | 168            | 3,5E-11                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1010,89       | 192            | 3,5E-11                                    |

| <b>PROBE III</b>             | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 5,1E-11                                    |
| W/Z Wert                     | 1,2           | 48             | 4,6E-11                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4          | 72             | 4,4E-11                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 12            | 144            | 3,3E-11                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95         | 168            | 3,1E-11                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39       | 192            | 3,1E-11                                    |


**KAPILLARMESSUNG**

| <b>PROBE I</b>               | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 6,2E-11                                    |
| W/Z Wert                     | 1,4           | 48             | 5,2E-11                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4          | 72             | 4,5E-11                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 12            | 144            | 4,7E-11                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95         | 168            | 4,7E-11                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1019,39       | 192            | 4,7E-11                                    |

| <b>PROBE II</b>              | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 6,9E-11                                    |
| W/Z Wert                     | 1,4           | 48             | 5,5E-11                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 4,4E-11                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 12            | 144            | 4,6E-11                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 4,6E-11                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 999,88        | 192            | 4,6E-11                                    |

| <b>PROBE III</b>             | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 7,7E-11                                    |
| W/Z Wert                     | 1,4           | 48             | 5,7E-11                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 4,7E-11                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 12,1          | 144            | 4,4E-11                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 4,6E-11                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1008,21       | 192            | 4,7E-11                                    |


**INSTITUT FÜR BODENMECHANIK,  
GRUNDBAU UND NUMERISCHE  
GEOTECHNIK**

**KAPILLARMESSUNG**

| <b>PROBE I</b>               | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 8E-11                                      |
| W/Z Wert                     | 1,6           | 48             | 7,1E-11                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 6,5E-11                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 11,9          | 144            | 6E-11                                      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 6E-11                                      |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 991,54        | 192            | 6E-11                                      |

| <b>PROBE II</b>              | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 8,9E-11                                    |
| W/Z Wert                     | 1,6           | 48             | 7,6E-11                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4          | 72             | 6,5E-11                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 12,1          | 144            | 6,3E-11                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95         | 168            | 6,3E-11                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1027,88       | 192            | 6,3E-11                                    |

| <b>PROBE III</b>             | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 8,6E-11                                    |
| W/Z Wert                     | 1,6           | 48             | 7E-11                                      |
| Durchmesser D [cm]           | 10,4          | 72             | 6,2E-11                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 11,8          | 144            | 6,4E-11                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 84,95         | 168            | 6,2E-11                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1002,40       | 192            | 6,4E-11                                    |








**KAPILLARMESSUNG**



| <b>PROBE I</b>               | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 8,3E-10                                    |
| W/Z Wert                     | 1,8           | 48             | 7,5E-10                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 6,3E-10                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 12,1          | 144            | 6E-10                                      |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 6E-10                                      |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1008,21       | 192            | 6E-10                                      |



| <b>PROBE II</b>              | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 9,2E-10                                    |
| W/Z Wert                     | 1,8           | 48             | 7,9E-10                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 5,8E-10                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 12,2          | 144            | 4,9E-10                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 4,9E-10                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1016,54       | 192            | 4,9E-10                                    |



| <b>PROBE III</b>             | <b>EINBAU</b> | <b>Stunden</b> | <b>Durchlässigkeit <math>k_{10}</math></b> |
|------------------------------|---------------|----------------|--|
|                              |               | 24             | 8,7E-10                                    |
| W/Z Wert                     | 1,8           | 48             | 7,6E-10                                    |
| Durchmesser D [cm]           | 10,3          | 72             | 6,5E-10                                    |
| Dürchströmte Länge I [cm]    | 12,1          | 144            | 5,4E-10                                    |
| Fläche A [cm <sup>2</sup> ]  | 83,32         | 168            | 5,4E-10                                    |
| Volumen V [cm <sup>3</sup> ] | 1008,21       | 192            | 5,4E-10                                    |



|  |                         | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK,<br/>GRUNDBAU UND NUMERISCHE<br/>GEOTECHNIK</b> |            |            |  |
|---|-------------------------|---|------------|------------|---|
| <b>INJEKTIONSVERSUCH</b>  |                         |   |            |            |   |
| <b>W/Z</b>  | [g]                     | 0,6   |            |            |   |
| <b>Wasser</b>   | [g]                     | 1943,69   |            |            |   |
| <b>Zement</b>   | [g]                     | 3239,49   |            |            |   |
| <b>Bentonit</b>   | [g]                     | 64,79   |            |            |   |
| <b>Versuch</b>  |                         | I   | II         | III        |   |
| <b>Dichte</b>   | [g/cm <sup>3</sup> ]    | 1,735   | 1,74       | 1,74       |   |
| <b>Marshzeit</b>  | [s]                     | -   | -          | -          |   |
| <b>Temperatur</b>   | [° C]                   | 26,2  | 26,7       | 27         |   |
| <b>Absetzmaß</b>  | [%]                     | 1,2   | 1,4        | 1,2        |   |
| <b>Fließgrenze</b>  | [KgL/N/m <sup>2</sup> ] | S12/109,25  | S12/109,25 | S12/109,25 |   |
| <b>Filtratwasser</b>  | [cm <sup>3</sup> ]      | 80,3  | 85,1       | 75,6       |   |
| <b>pH</b>   | [-]                     | 13,2  | 13,3       | 13,3       |   |



|  |                         | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK,<br/>GRUNDBAU UND NUMERISCHE<br/>GEOTECHNIK</b> |          |          |  |
|---|-------------------------|---|----------|----------|---|
| <b>INJEKTIONSVERSUCH</b>  |                         |   |          |          |   |
| <b>W/Z</b>  | [g]                     | 0,8   |          |          |   |
| <b>Wasser</b>   | [g]                     | 2128,45   |          |          |   |
| <b>Zement</b>   | [g]                     | 2660,56   |          |          |   |
| <b>Bentonit</b>   | [g]                     | 53,21   |          |          |   |
| <b>Versuch</b>  |                         | I   | II       | III      |   |
| <b>Dichte</b>   | [g/cm <sup>3</sup> ]    | 1,6   | 1,59     | 1,59     |   |
| <b>Marshzeit</b>  | [s]                     | 109   | 114      | 105      |   |
| <b>Temperatur</b>   | [° C]                   | 19,4  | 20,8     | 19,7     |   |
| <b>Absetzmaß</b>  | [%]                     | 1,6   | 1,7      | 1,6      |   |
| <b>Fließgrenze</b>  | [KgL/N/m <sup>2</sup> ] | S9/80,16  | S9/80,16 | S9/80,16 |   |
| <b>Filtratwasser</b>  | [cm <sup>3</sup> ]      | 158,3   | 157,5    | 156      |   |
| <b>pH</b>   | [-]                     | 13,2  | 13,1     | 13,1     |   |

|  |                          | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK,<br/>GRUNDBAU UND NUMERISCHE<br/>GEOTECHNIK</b> |         |         |  |
|---|--------------------------|---|---------|---------|---|
| <b>INJEKTIONSVERSUCH</b>  |                          |   |         |         |   |
| <b>W/Z</b>  | [g]                      | 1   |         |         |   |
| <b>Wasser</b>   | [g]                      | 2257,18   |         |         |   |
| <b>Zement</b>   | [g]                      | 2257,18   |         |         |   |
| <b>Bentonit</b>   | [g]                      | 45,14   |         |         |   |
| <b>Versuch</b>  |                          | I   | II      | III     |   |
| <b>Dichte</b>   | [g/cm <sup>3</sup> ]     | 1,475   | 1,48    | 1,48    |   |
| <b>Marshzeit</b>  | [s]                      | 49  | 51      | 50      |   |
| <b>Temperatur</b>   | [° C]                    | 18,9  | 19,4    | 19,7    |   |
| <b>Absetzmaß</b>  | [%]                      | 3,4   | 4       | 4       |   |
| <b>Fließgrenze</b>  | [Kgl./N/m <sup>2</sup> ] | 9/54,86   | 9/54,86 | 9/54,86 |   |
| <b>Filtratwasser</b>  | [cm <sup>3</sup> ]       | 179,2   | 185,3   | 182,4   |   |
| <b>pH</b>   | [-]                      | 13,3  | 13,5    | 13,2    |   |

|  |                          | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK,<br/>GRUNDBAU UND NUMERISCHE<br/>GEOTECHNIK</b> |         |         |  |
|---|--------------------------|---|---------|---------|---|
| <b>INJEKTIONSVERSUCH</b>  |                          |   |         |         |   |
| <b>W/Z</b>  | [g]                      | 1,2   |         |         |   |
| <b>Wasser</b>   | [g]                      | 2352,02   |         |         |   |
| <b>Zement</b>   | [g]                      | 1960,02   |         |         |   |
| <b>Bentonit</b>   | [g]                      | 39,2  |         |         |   |
| <b>Versuch</b>  |                          | I   | II      | III     |   |
| <b>Dichte</b>   | [g/cm <sup>3</sup> ]     | 1,405   | 1,415   | 1,415   |   |
| <b>Marshzeit</b>  | [s]                      | 40  | 39,5    | 38,5    |   |
| <b>Temperatur</b>   | [° C]                    | 17,6  | 18,5    | 18,1    |   |
| <b>Absetzmaß</b>  | [%]                      | 4,1   | 4,3     | 4,5     |   |
| <b>Fließgrenze</b>  | [Kgl./N/m <sup>2</sup> ] | 7/34,92   | 7/34,92 | 7/34,92 |   |
| <b>Filtratwasser</b>  | [cm <sup>3</sup> ]       | 203,5   | 205,3   | 207,8   |   |
| <b>pH</b>   | [-]                      | 13,2  | 13,2    | 13,1    |   |

|  |                          | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK,<br/>GRUNDBAU UND NUMERISCHE<br/>GEOTECHNIK</b> |         |         |  |
|---|--------------------------|---|---------|---------|---|
| <b>INJEKTIONSVERSUCH</b>  |                          |   |         |         |   |
| <b>W/Z</b>  | [g]                      | 1,4   |         |         |   |
| <b>Wasser</b>   | [g]                      | 2424,79   |         |         |   |
| <b>Zement</b>   | [g]                      | 1731,99   |         |         |   |
| <b>Bentonit</b>   | [g]                      | 34,64   |         |         |   |
| <b>Versuch</b>  |                          | I   | II      | III     |   |
| <b>Dichte</b>   | [g/cm <sup>3</sup> ]     | 1,36  | 1,365   | 1,36    |   |
| <b>Marshzeit</b>  | [s]                      | 32,6  | 33,5    | 34,3    |   |
| <b>Temperatur</b>   | [° C]                    | 18,4  | 18,2    | 18,1    |   |
| <b>Absetzmaß</b>  | [%]                      | 7,6   | 8       | 7,8     |   |
| <b>Fließgrenze</b>  | [Kgl./N/m <sup>2</sup> ] | 5/17,03   | 5/17,03 | 5/17,03 |   |
| <b>Filtratwasser</b>  | [cm <sup>3</sup> ]       | 223,6   | 225,1   | 224,5   |   |
| <b>pH</b>   | [-]                      | 13,2  | 13,2    | 13,1    |   |

|  |                          | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK,<br/>GRUNDBAU UND NUMERISCHE<br/>GEOTECHNIK</b> |        |        |  |
|---|--------------------------|---|--------|--------|---|
| <b>INJEKTIONSVERSUCH</b>  |                          |   |        |        |   |
| <b>W/Z</b>  | [g]                      | 1,6   |        |        |   |
| <b>Wasser</b>   | [g]                      | 2482,39   |        |        |   |
| <b>Zement</b>   | [g]                      | 1551,49   |        |        |   |
| <b>Bentonit</b>   | [g]                      | 31,03   |        |        |   |
| <b>Versuch</b>  |                          | I   | II     | III    |   |
| <b>Dichte</b>   | [g/cm <sup>3</sup> ]     | 1,33  | 1,325  | 1,33   |   |
| <b>Marshzeit</b>  | [s]                      | 30,4  | 30,2   | 30,5   |   |
| <b>Temperatur</b>   | [° C]                    | 18,1  | 17,8   | 18,3   |   |
| <b>Absetzmaß</b>  | [%]                      | 12,7  | 12,2   | 12,3   |   |
| <b>Fließgrenze</b>  | [Kgl./N/m <sup>2</sup> ] | 3/9,62  | 3/9,62 | 3/9,62 |   |
| <b>Filtratwasser</b>  | [cm <sup>3</sup> ]       | 244,5   | 244,1  | 244,4  |   |
| <b>pH</b>   | [-]                      | 13  | 12,9   | 13,2   |   |

|  |                          | <b>INSTITUT FÜR BODENMECHANIK,<br/>GRUNDBAU UND NUMERISCHE<br/>GEOTECHNIK</b> |        |        |  |
|---|--------------------------|---|--------|--------|---|
|   |                          | <b>INJEKTIONSVERSUCH</b>  |        |        |   |
| <b>W/Z</b>  | [g]                      | 1,8   |        |        |   |
| <b>Wasser</b>   | [g]                      | 2529,12   |        |        |   |
| <b>Zement</b>   | [g]                      | 1405,07   |        |        |   |
| <b>Bentonit</b>   | [g]                      | 28,1  |        |        |   |
| <b>Versuch</b>  |                          | I   | II     | III    |   |
| <b>Dichte</b>   | [g/cm <sup>3</sup> ]     | 1,29  | 1,295  | 1,295  |   |
| <b>Marshzeit</b>  | [s]                      | 29,6  | 30,3   | 30,5   |   |
| <b>Temperatur</b>   | [° C]                    | 18,1  | 18     | 18,4   |   |
| <b>Absetzmaß</b>  | [%]                      | 16  | 17     | 17     |   |
| <b>Fließgrenze</b>  | [Kgl./N/m <sup>2</sup> ] | 2/6,43  | 2/6,43 | 2/6,43 |   |
| <b>Filtratwasser</b>  | [cm <sup>3</sup> ]       | 250,4   | 249,6  | 250,1  |   |
| <b>pH</b>   | [-]                      | 13,1  | 13,2   | 13,1   |   |

